
“Modelación del transporte de cloruros en estructuras de concreto: análisis unidimensional y efecto de borde”

Tesis de Maestría presentada a la Universidad del Norte como requisito
parcial para la obtención del título de Maestría en Ingeniería Civil con
énfasis en Estructuras

Autor

Diego Alejandro Pereira García

Ingeniero Civil – Universidad del Norte

Director

Margareth Josefina Dugarte Coll

Ingeniera Civil, PhD.

Barranquilla

MARZO DE 2016

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer en primer lugar a la Fundación Juan Pablo Gutiérrez Cáceres que a través de ellos tuve la oportunidad económica de estudiar una maestría.

A la Universidad del Norte por ser de gran apoyo en el duro proceso que he tenido a lo largo de mis estudios.

A mi directora de tesis, la Ingeniera Margareth Dugarte, por su acompañamiento, consejos, sugerencias y su paciencia.

A todos y cada uno de los profesores que hicieron parte de mis estudios de postgrado de manera directa o indirecta, porque gracias a ellos he logrado llegar a obtener los conocimientos y formación requeridos en la carrera y maestría.

Desde mi corazón guardando un lugar muy importante, a mis padres quienes siempre se esforzaron al igual que mi familia y mis amigos sintiendo de todos el apoyo y confianza brindándome su compañía y fortaleza por difíciles que fueran los tiempos.

A Darial y a Kim, quienes en un acto de verdaderos amigos me ayudaron a superar y mejorar inconvenientes y circunstancias para así poder culminar la maestría.

RESUMEN EJECUTIVO

La corrosión es un fenómeno que afecta al acero, llevándolo a un estado más estable por oxido-reducción, incluso si se encuentra embebido en el concreto. La corrosión afecta la durabilidad de las estructuras ya que reduce la sección útil del acero, y a su vez genera productos expansivos que inducen esfuerzos de tensión indeseables en el concreto. Para dicho caso la corrosión ocurre principalmente por la acumulación de cloruros en la superficie del acero. Este ión, presente en el ambiente, ingresa al concreto debido a las diferencias de concentración, humedad y/o presión que hay entre el medio y el interior del concreto. A medida que los cloruros se acumulan en la superficie del acero de refuerzo, debilitan su capa pasiva hasta romperla y dar inicio a la corrosión.

El enfoque de este documento corresponde al modelado del avance del ión cloruro por difusión en concreto reforzado. La difusión es el método de transporte (por diferencia de concentración) que prima en la mayoría de estructuras de concreto y ocurre en la matriz de concreto. El modelado es realizado usando un software llamado Comsol Multiphysics®, que utiliza ecuaciones diferenciales de procesos físicos, y las analiza mediante elementos finitos. La finalidad del modelo realizado consiste en poder obtener perfiles de cloruros en el concreto y explorar valores de coeficientes de difusión típicos de estructuras sometidas a cloruros en el ambiente, ya sea una estructura ubicada en zonas costeras o en contacto directo con agua de mar. Para la validación del modelo se emplean perfiles de cloruros medidos en el laboratorio a partir de especímenes en inmersión, de los cuales se obtienen parámetros como el coeficiente de difusión aparente y la concentración de cloruros en la superficie, usados para simular el fenómeno de difusión en 1D o 2D. Este modelo base puede ser comparado con cualquier estructura empleando parámetros similares.

Al conocer la cantidad de cloruros dentro del concreto y la profundidad a la que se encuentra el acero de refuerzo (recubrimiento), se puede predecir el tiempo de inicio de la corrosión, que ocurrirá debido a la acumulación de cloruros en algunas zonas de su superficie. El modelo fue planteado con geometrías unidimensionales que pueden representar secciones transversales de losas o tableros de puentes y muros de edificios. De igual manera, se plantearon geometrías bidimensionales para simular secciones de vigas o columnas, las cuales consideran el efecto de borde al tener una penetración en 2 direcciones. Se consideró una exposición y un coeficiente de difusión aparente constante en el tiempo. Los resultados del modelo fueron el contenido de cloruros en el concreto,

representado por perfiles de cloruros para los casos 1D y curvas de nivel del contenido de cloruros para los casos 2D.

Como conclusión, se obtuvo que los modelos de transporte de cloruros en dos direcciones, al considerar el efecto de borde, representan mejor el fenómeno en vigas y columnas. Los resultados pueden usarse en cualquier estructura con condiciones similares. Se mostró que los casos críticos se presentan en los bordes, debido a que alcanzan el umbral de cloruros más rápidamente. Esto reduce la vida útil de la estructura ya que des-pasiva el acero de refuerzo y da inicio a la corrosión.

Adicionalmente, se encontró que la vida útil de una estructura con concreto de 3000 psi y recubrimiento de 5 cm para el acero, sería de 5.44 años al ser modelada en una dimensión. Sin embargo, al considerar el efecto de borde, disminuye la vida útil.

A partir de un análisis estadístico de valores del umbral de cloruros encontrados en la literatura, se calcularon los valores de umbral de cloruros para los cuales existe una probabilidad de inicio de corrosión de 10, 20, 30, 40 y 50% los cuales corresponden a: 0.1361, 0.4390, 0.6574, 0.8440 y 1.0184 %wc respectivamente.

Palabras claves: Concreto, corrosión, cloruros, difusión, modelo, durabilidad.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|------|
| AGRADECIMIENTOS..... | i |
| RESUMEN EJECUTIVO | ii |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | vi |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | viii |
| ÍNDICE DE VARIABLES | ix |
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 2. PREGUNTA PROBLEMA..... | 5 |
| 3. OBJETIVOS | 5 |
| 1.1 Objetivo General..... | 5 |
| 1.2 Objetivos Específicos | 5 |
| 4. MARCO TEÓRICO | 6 |
| 4.1 Corrosión..... | 6 |
| 4.2 Cloruros en el concreto y su durabilidad | 7 |
| 4.3 Umbral de cloruros en el concreto | 8 |
| 4.4 Modelos de transporte de cloruros en el concreto | 10 |
| 4.5 Modelo de difusión de cloruros..... | 12 |
| 4.5.1 Solución numérica de las leyes de Fick | 17 |
| 5. METODOLOGÍA..... | 20 |
| 5.1 Revisión Bibliográfica..... | 21 |
| 5.2 Consideraciones del modelo..... | 21 |
| 5.3 Definición de la Geometría | 21 |

| | | |
|-------|--|----|
| 5.4 | Definición de los materiales..... | 24 |
| 5.5 | Definición de la física, variables y ecuaciones a usar | 24 |
| 5.6 | Mallado del modelo | 26 |
| 6. | RESULTADOS..... | 29 |
| 6.1 | DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS EN TÉRMINOS DE DURABILIDAD..... | 31 |
| 6.1.1 | Análisis estadístico del umbral de cloruros | 31 |
| 6.1.2 | Curvas de probabilidad de inicio de corrosión | 33 |
| 6.2 | ANÁLISIS BIDIMENCIONAL, EFECTO DE BORDE | 39 |
| 7. | VALIDACIÓN DEL MODELO 1D..... | 45 |
| 7.1 | Toma de Datos | 45 |
| 7.2 | Selección de parámetros | 51 |
| 7.3 | Análisis de resultados | 54 |
| 8. | VALIDACIÓN DEL MODELO 2D..... | 58 |
| 8.1 | Toma de Datos | 58 |
| 8.2 | Selección de parámetros | 60 |
| 8.3 | Análisis de resultados | 62 |
| 9. | SENSIBILIDAD DEL MODELO | 64 |
| 10. | CONCLUSIONES..... | 69 |
| 11. | Bibliografía..... | 71 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. División porcentual de los costos por corrosión. (Koch et al., 2002). | 3 |
| Figura 2. Gráfica de la función error complementaria | 19 |
| Figura 3. Definición de la geometría del modelo | 22 |
| Figura 4. Definición de Características del Concreto..... | 24 |
| Figura 5. Mallado de la geometría..... | 27 |
| Figura 6. Perfiles de cloruros para los prototipos M1, M2, M3 y M4 | 29 |
| Figura 7. Gráfica de datos teóricos vs modelo | 30 |
| Figura 8. Comparación de la trayectoria recorrida por el ión cloruro M2-M4 | 30 |
| Figura 9. Probabilidad de umbral de cloruros | 33 |
| Figura 10. Estimación de recubrimiento para el inicio de la corrosión..... | 34 |
| Figura 11. Contenido de Cloruros en la superficie del acero vs tiempo | 35 |
| Figura 12. Cálculo gráfico de probabilidad de inicio de corrosión | 36 |
| Figura 13. Cálculo grafico de tiempo de inicio de corrosión | 38 |
| Figura 14. Comparación transporte de cloruros 1D vs 2D- ruta crítica..... | 41 |
| Figura 15. Perfil de cloruros para diferentes tiempos 1D | 42 |
| Figura 16. Perfil de cloruros para diferentes tiempos 2D | 43 |
| Figura 17. Superposición perfiles de cloruros 1D y 2D según el trayecto crítico | 43 |
| Figura 18. Gráfica de factor de aumento 2D/1D en diferentes tiempos | 44 |
| Figura 19. Cilindros pintados para ensayo de inmersión a cloruros | 46 |
| Figura 20. Toma de polvo en cilindro | 46 |
| Figura 21. Polvo de concreto almacenado | 46 |

| | |
|---|----|
| Figura 22. Toma de muestra para ensayo | 47 |
| Figura 23. Disolución de muestra en agua destilada y ácido Nítrico | 47 |
| Figura 24. Muestra de polvo de Cemento | 47 |
| Figura 25. Perfil de cloruros C1 | 50 |
| Figura 26. Perfil de cloruros C2 | 50 |
| Figura 27. Perfil de cloruros C3 | 51 |
| Figura 28. Perfiles de cloruros C4 | 51 |
| Figura 29. Perfil de Cloruros modelo a 2 años | 53 |
| Figura 30. Perfil de cloruros de cilindros vs perfil Roa-Rodríguez..... | 55 |
| Figura 31. Exposición superficial de las muestras | 55 |
| Figura 32. Contenido inicial de cloruros en las muestras..... | 56 |
| Figura 33. Coeficiente de Difusión en las muestras | 56 |
| Figura 34. Dispersión de datos medidos contra modelo 1D | 56 |
| Figura 35. Cubo pintado para medición | 59 |
| Figura 36. Toma de polvo en cubo | 59 |
| Figura 37. Curvas de contenido de Cl en el Cubo 1 | 60 |
| Figura 38. Ingreso de cloruros en 2D Comsol®..... | 61 |
| Figura 39. Dispersión de datos medidos contra modelo 2D | 62 |
| Figura 40. Gráfica de variación de recubrimiento vs contenido de cloruro..... | 65 |
| Figura 41. Gráfica de variación de exposición superficial vs contenido de cloruro | 66 |
| Figura 42. Gráfica de variación de tiempo vs contenido de cloruro | 66 |
| Figura 43. Gráfica de variación de coeficiente de difusión vs contenido de cloruro..... | 67 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Tabla de valores para el inicio de la corrosión adaptada de (Alonso et al., 2000).. | 9 |
| Tabla 2. Recopilación de investigaciones de transporte de cloruros (experimentación y modelos) | 16 |
| Tabla 3. Asignación de valores de frontera | 26 |
| Tabla 4. Distribución de mallado del modelo | 27 |
| Tabla 5. Datos de tendencia central y variabilidad del umbral de cloruros | 32 |
| Tabla 6. Correspondencia de probabilidad inicio de corrosión vs Cl% wc y Kg/m ³ en un concreto de 400 Kg de cemento/m ³ | 32 |
| Tabla 7. Relación w/c-Df | 37 |
| Tabla 8. Tabla de diseño de mezcla para el concreto 3000 psi | 45 |
| Tabla 9. Valores medidos de cloruros de 4 cilindros | 48 |
| Tabla 10. Valores de las réplicas de cloruros de los cilindros | 49 |
| Tabla 11. Parámetros de regresión de datos | 51 |
| Tabla 12. Comparación de datos medidos vs Modelo vs Teoría C1 | 52 |
| Tabla 13. Calculo de Error del Modelo propuesto y modelo de Roa- Rodríguez (2013) | 53 |
| Tabla 14. Tabla de Diseño de mezcla para el concreto 3000 psi | 58 |
| Tabla 15. Coordenadas para toma de muestras en cubo en cm | 59 |
| Tabla 16. Valores medidos de cloruros | 60 |
| Tabla 17. Comparación de datos experimentales cubo 1 vs modelo | 61 |
| Tabla 18. Intervalos de Variacion de variables independientes | 64 |
| Tabla 19. Índices de sensibilidad ante los distintos parámetros de entrada del modelo | 68 |

ÍNDICE DE VARIABLES

| Variables | Unidad | Descripción |
|-----------|---------------------|--|
| Cx | Kg, %wc | Contenido de cloruros en el concreto |
| T | Seg, año | Tiempo de exposición de la estructura |
| X | cm, m | Distancia de recubrimiento de concreto |
| Df | m ² /seg | Coeficiente de difusión |
| Dfa | m ² /seg | Coeficiente de difusión aparente |
| Cs | Kg, %wc | Contenido de cloruros en la superficie de concreto |
| Co | Kg, %wc | Contenido inicial de cloruros en el concreto |
| S | adimensional | Índice de variabilidad |
| OPC | [] | Cemento Portland Ordinario |
| P | [] | Probabilidad de inicio de corrosión |

1. INTRODUCCIÓN

El concreto reforzado es uno de los materiales de construcción más usados hoy en día debido a su durabilidad y facilidad de uso en comparación con otros materiales (Nelson, 2013). Sin embargo, es vulnerable a diferentes agentes que se encuentran en el ambiente, entre los cuales se encuentra el ión cloruro, principal causa de la corrosión en el acero de refuerzo. La corrosión inducida por ión cloruro es una problemática que afecta la durabilidad de las estructuras de concreto reforzado ya que naturalmente deteriora elementos metálicos embebidos por la interacción que tiene con el medio (Koch et al., 2002). Este deterioro presentado en las estructuras de concreto reforzado ha llamado la atención debido a su aparición inesperada y los altos costos incurridos en su reparación (ACI, 2001).

El proceso de corrosión es un fenómeno electro-químico que ocurre en el acero de refuerzo y genera productos expansivos, éstos a su vez generan esfuerzos de tensión en el recubrimiento; que por la poca resistencia a la tensión del concreto, dan inicio a la liberación de energía por generación de grietas (Torres Acosta et al., 2006) (Steven F., 2014). No hay manera de saber a simple vista si se ha iniciado o no la corrosión en el acero de refuerzo, por eso es un fenómeno importante que se debe entender con el fin de generar modelos de predicción confiables. Dado que el ingreso de cloruros en el concreto reforzado es el detonante del deterioro en las estructuras a largo plazo, se estudian a continuación los factores que dominan éste fenómeno y se entiende que el objetivo de todo diseño es que su vida útil no disminuya por efectos de la corrosión.

Estudios desarrollados en torno a ésta problemática han concluido que, dicho fenómeno, se presenta principalmente por un alto contenido de cloruros en la superficie del acero de refuerzo llamado umbral de cloruros. Con el pasar del tiempo, los cloruros penetran por difusión en el concreto acumulándose lo suficiente en la superficie del acero y sobrepasando el valor umbral. (Nelson, 2013) (Alonso et al., 2000) (Ann y Song, 2007). Al ocurrir éste ingreso de cloruros en condiciones de alta alcalinidad propicias en el concreto, usualmente generado por la presencia de NaOH y KOH, se libera OH⁻ y se genera una disminución del PH en el agua de poros. Dicha disminución del PH en la interfaz acero-concreto ha sido relacionada con la destrucción de la capa pasiva que protege al acero. Por este motivo el recubrimiento del acero es de vital importancia, debido a que la velocidad en la que ocurre este proceso químico aumenta a medida que se deteriora el concreto. Es decir, que al modelar el transporte de cloruros en el concreto se puede predecir en qué tiempo se acumulan los cloruros en la superficie del acero hasta el punto

crítico donde se rompe la capa pasiva (umbral de cloruros) y se da inicio a la corrosión (Torres Acosta et al., 2006).

Estos daños se presentan principalmente en estructuras que se encuentran en ambientes agresivos, ambientes cercanos al mar y lugares en zona de mareas ya que hay un constante ingreso de agua y oxígeno, elementos necesarios para el inicio de la corrosión (Schueremans et al., 2007). Las estructuras en zonas costeras son más vulnerables, ya que la cantidad de cloruros a las que están expuestas son mayores debido a la salinidad.

Los daños generados en las estructuras, ya sean de concreto reforzado o únicamente de acero, son incontables y usualmente reparados para aumentar su vida útil. Los costos en los que incurre un país por la reparación o mantenimiento de estructuras afectadas por corrosión, representan una parte importante de la economía. Son usualmente, estructuras como edificios públicos (colegios, hospitales, edificios de oficinas, residenciales, entre otros), vías, canales y/o tuberías, la infraestructura que constituye el funcionamiento diario de la economía y el desarrollo (Koch et al., 2002), por este motivo es mejor prevenir o controlar el fenómeno que repararlo.

Un estudio realizado por la Administración Federal de Autopistas en los Estados Unidos mostró, que los costos anuales en los que incurre la nación debido a la corrosión en el sector industrial son alrededor de 137.9 billones de dólares, de los cuales 22.6 billones pertenecen a reparaciones en infraestructuras, es decir el 16.4%. Estos gastos representan aproximadamente el 3.1% del producto interno bruto del país, como se muestra en la Figura 1 (GDP-Gross Domestic Product) (Koch et al., 2002).

La prevención de estos daños podría generar ahorros significativos para un país en cualquier sector. Sin embargo, no se pueden reducir a cero estos costos ya que no existe estructura inmune a estos daños, por lo cual siempre habrán costos de mantenimiento.

COST OF CORROSION IN INDUSTRY CATEGORIES (\$137.9 BILLION)

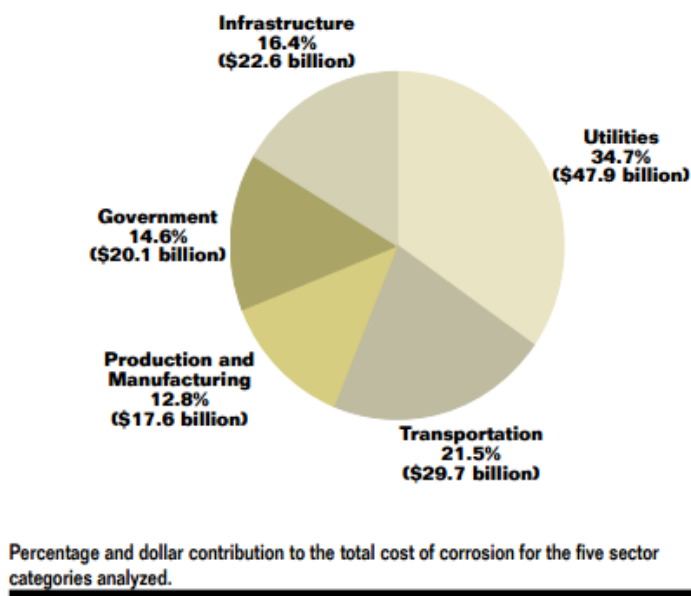


Figura 1. División porcentual de los costos por corrosión. (Koch et al., 2002).

De la misma forma que en el sector industrial, la corrosión afecta el sector de infraestructura; por ello, por ejemplo, se han investigado por años los daños en tableros de puentes dado que son estructuras que componen la infraestructura vial y de importancia para las agencias de transporte. Un ejemplo de ello fue la investigación realizada por el Ingeniero Guzmán Gutiérrez (Madrid 2010) sobre el deterioro de tableros de puentes de hormigón por ingreso de cloruros y la corrosión en el acero embebido. En su estudio, modela la penetración de cloruros por difusión considerando la influencia de los poros del concreto en este proceso, factor determinante en la velocidad de ingreso de cloruros. Como conclusión, obtuvo que una exposición de cloruros variable generaba un ingreso más lento que una condición media constante (Guzmán, 2010); lo cual indica que los modelos que consideran una exposición media constante son un poco más conservadores que aquellos que consideran la exposición variable.

En la última década se ha aumentado el uso de los modelos de difusión de cloruros en una dimensión (Poulsen y Meljbro, 2010)(Ali, 2010)(Zofia y Adam, 2013), pero aún más reciente es la investigación de la difusión de cloruros en 2D; relacionado con el fenómeno en las esquinas (Yang et al., 2013). Este último, muestra que el efecto de borde es crítico en la acumulación de cloruros debido a que existe un aporte en 2 direcciones. Esto es de vital importancia, dado que en la mayoría de los casos, el fenómeno ocurre en elementos estructurales como vigas y columnas donde primaría la corrosión en las esquinas.

Para la generación de perfiles de cloruros se realiza un análisis de polvo de concreto extraído a diferentes profundidades para determinar el contenido de cloruros presente. Existen ensayos que determinan los cloruros solubles en agua mientras que otros determinan los solubles en ácido (ASTM C1218 y ASTM C1152 respectivamente). El motivo de esta diferencia es que, internamente en el concreto los cloruros pueden encontrarse como cloruros libres diluidos en el agua de poros y como cloruros enlazados en la matriz de concreto: la suma de los anteriores se le llama: cloruros totales. Usualmente los cloruros libres son los generadores de corrosión debido a que se transportan en la matriz y los poros en el concreto; sin embargo, los cloruros enlazados pueden aportar significativamente en el comienzo de la corrosión. Esto sucede principalmente ya que en el momento en que el cemento se hidrata, rompe enlaces de cloruros, es decir, que los cloruros enlazados se liberan y pasan a ser cloruros libres, que aportan en la generación de la corrosión (Glass et al, 2000). Por esta razón y dada la incertidumbre en la determinación exacta de los cloruros fijados, se considera que la mejor manera de representar el fenómeno en un modelo es con los cloruros totales.

En resumen, los factores que se deben tener en cuenta para aumentar la durabilidad de una estructura contra la corrosión inducida por cloruros son: el tiempo, el recubrimiento del acero, el coeficiente de difusión aparente de cloruros en el concreto y la cantidad de cloruros a la que se expone la estructura. Por estas variables, ya no sólo se debe pensar en tener una mezcla resistente a las cargas de servicio, es decir, para el uso final de la estructura (Puentes, Casas, Edificios, Presas, entre otros), sino que es pertinente proteger del entorno en el que se encuentre; lo cual cambiaría la manera de diseñar nuestras estructuras de concreto reforzado, ya que actualmente sólo se enfoca en diseño por resistencia, con el tiempo se incluirá el diseño por durabilidad.

2. PREGUNTA PROBLEMA

¿Es posible generar un modelo para predecir el perfil de cloruros en una estructura de concreto con miras a extender su durabilidad?

3. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Emplear una herramienta de software para la modelación del transporte de cloruros en concreto bajo ciertos escenarios y su validación experimental.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar los parámetros y ecuaciones que gobiernan el fenómeno de difusión de cloruros en el concreto.
- Establecer las condiciones de frontera del modelo, materiales y ecuaciones a emplear en el modelo del transporte de cloruros usando el software Comsol Multiphysics®.
- Modelar el transporte de cloruros en el concreto para geometrías 1D y 2D.
- Evaluar el efecto de borde y sus implicaciones en la durabilidad de las estructuras de concreto.
- Realizar un análisis estadístico de valores del umbral de cloruros encontrados en la literatura que permitan, usando los parámetros del modelo, hacer estimaciones de probabilidad de inicio de corrosión.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 CORROSIÓN

Se llama corrosión usualmente al deterioro de los metales cuando tratan de llegar a su estado natural, o a un estado químicamente más estable, este fenómeno puede modificar características del metal (Torres Acosta, 2006). La vulnerabilidad de diferentes metales a sufrir dicho fenómeno depende de la energía que se le haya aplicado para modificarlo o volverlo un metal comercial, por este motivo son más vulnerables metales como el aluminio, hierro y magnesio que la plata y el oro (Torres Acosta, 2006).

Para que ocurra la corrosión debe existir 4 elementos básicos (Steven F., 2014):

- Ánodo: zona donde ocurre la corrosión y donde se origina una corriente
- Cátodo: zona hacia donde se dirige la corriente, no ocurre corrosión.
- Electrolito: Medio capaz de conducir la corriente mediante un flujo iónico.
- Puente Metálico: conexión entre el ánodo y el cátodo.

El nombre químico para el fenómeno de corrosión es la oxido-reducción donde la oxidación o reacción anódica se genera por el incremento en la valencia del elemento, es decir, aumento en la producción de electrones; mientras que la reducción, o reacción catódica, se atribuye a la disminución de electrones de valencia. Dichas reacciones ocurren de manera simultánea en la superficie del metal. En algunas reacciones de corrosión, la oxidación se produce uniformemente en la superficie; mientras que en otros casos, ésta es localizada (ocurre en un área específica) (Torres Acosta, 2006).

El acero que se encuentra en estructuras de concreto no se ve afectado inicialmente, debido a que se forma una capa superficial de óxido en el acero que al encontrarse en el ambiente alcalino del concreto se estabiliza, a esta capa se la llama capa pasiva. La acumulación de cloruros en la superficie de la capa pasiva disminuye el PH del entorno del acero y rompe la capa (Steven F., 2014).

La corrosión es usada para determinar la vida útil de una estructura. Según el modelo de Tuutti (1982), la corrosión se divide en dos períodos: iniciación y propagación. La iniciación es el periodo antes que la despasivación sea detectada, es decir, antes que el contenido de cloruros supere el umbral de cloruros. El período de propagación se caracteriza por que la velocidad de corrosión es mayor (0.010 mm/año-0.100 mm/año) (Nelson, 2013).

4.2 CLORUROS EN EL CONCRETO Y SU DURABILIDAD

Los cloruros que se encuentran en el ambiente tiene diferentes proporciones dependiendo del sitio, en los lugares donde más proporción hay es en los ambientes marinos, donde son muy usadas las estructuras de concreto reforzado (puentes, diques, edificios costeros, muelles, entre otros) (Poulsen et. al, 2006). Estos iones por diferentes métodos ingresan a la matriz de concreto y a sus poros, transportándose y reaccionando químicamente con sus componentes, generando las condiciones propicias para la corrosión del acero de refuerzo.

En el concreto existen cloruros en los poros que son absorbidos durante la hidratación del cemento a estos se les llama cloruros enlazados (Glass et al., 2000), la cantidad de cloruros que hay internamente en el concreto, ya sean libres o enlazados, depende principalmente de la agresividad del ambiente y de la capacidad de enlace químico en el concreto. El enlace de los cloruros al concreto se debe a que los componentes del cemento C_3A (aluminato tricálcico) y C_4AF (ferro-aluminato tetracálcico) tienen capacidad de enlazar cloruros, al igual que concretos con aditivos como las puzolanas (Mindess et al., 2002).

Los cloruros en el concreto, tanto los libres como los enlazados químicamente y los totales, se miden en cantidad de cloruros por peso de cemento como un porcentaje masa-masa (%wc) o en masa por unidad de volumen de concreto (Kg/m^3). La medida del contenido de cloruros en concreto es de gran importancia, ya que con base en ésta se puede establecer el punto inminente de iniciación de la corrosión en las barras de refuerzo (Ann et. al., 2007). El contenido de cloruros es tomado a nivel del acero de refuerzo, y puede ser usada para determinar el nivel de daño de una estructura expuesta a altas cantidades de cloruros a un determinado tiempo. El tiempo en que los cloruros transportados de la superficie del concreto hasta la superficie del acero lleguen al nivel umbral, corresponde al tiempo útil de una estructura, ya que en el momento en que la corrosión comienza no se detiene.

Al variar el espesor de recubrimiento de las barras en estructuras, se aumenta el trayecto que deben recorrer los iones cloruros para llegar al acero. Para aumentar la durabilidad se debe saber qué recubrimiento es necesario o cómo mejorar las propiedades del concreto (porosidad, coeficiente de difusión, entre otros) en este recubrimiento, dificultando el acceso de cloruros en el concreto (Schueremans et. al., 2007). Al conocer la velocidad de penetración del ión, es decir el coeficiente de difusión de cloruros en el concreto, se puede estimar el recubrimiento necesario para una determinada vida útil (Sanjuan, 2005). Estos iones se transportan más fácilmente en el aire que en la matriz

cementante, por lo cual los poros son muy importantes al momento de investigar el transporte de cloruros. En caso que el concreto posea fisuras, éstas facilitarán la entrada de aire y con esto los cloruros que dañarán más fácilmente el concreto (Morris W., 2004).

4.3 UMBRAL DE CLORUROS EN EL CONCRETO

Se llama nivel crítico de cloruros o umbral de cloruros, a una acumulación crítica de cloruros en la interface acero-concreto, la cual es proporcional a los iones OH^- en la solución de poro del concreto (Goran, 2011). El umbral de cloruros depende principalmente de la alcalinidad del concreto, de la capacidad de enlace cloruro-matriz cementante, el nivel de saturación, la resistividad del concreto al flujo de iones, entre otros (Ann y Song, 2007). Se ha demostrado que, la resistividad del concreto cambia el umbral de cloruros, por ejemplo un aumento en la resistividad de 2 a 100 $\text{k}\Omega \text{ cm}$ generaría un aumento en el umbral de cloruros de 0.44 a 2.32 %wc (Morris, 2004). Por lo cual, el umbral de cloruros es muy variable y no se puede conocer un valor exacto para cada tipo de concreto. La determinación del umbral de cloruros es un tema debatido en la literatura dado los procesos de pasivación o despasivación del acero en la interface acero-concreto, así como su interacción con las sustancias diluidas en el agua de poros, lo cual dificulta la determinación de un valor exacto.

Al igual que la cantidad de cloruros, el nivel de cloruros crítico en el concreto tiene medidas usuales de cantidad de cloruros por volumen de concreto (Kg/m^3 , g/Lt , mol/Lt) y también se puede expresar como un porcentaje por peso de cemento (%wc). Experimentalmente se han encontrado muchos valores diferentes del contenido crítico de cloruros que varían en un rango de valores de 0.23 a 1.52 %wc para mezclas ordinarias de concreto (Ann et. al., 2007). Igualmente se ha encontrado que no sólo los cloruros libres son los que generan la corrosión en el acero, sino que los cloruros enlazados en componentes del cemento como el C_3A y el C_4AF pueden liberarse al decaer el ph de la solución de los poros (Glass et al., 2000), por lo cual es preferible realizar mediciones de cloruros totales.

La tabla 1 fue una adaptada de Alonso et al. (2000), contiene la información de diferentes umbrales de cloruros, donde se muestra que no hay un valor exacto para el nivel crítico de cloruros, se sabe que ese fenómeno se da a porcentajes (%wc) inferiores a 2% para la mayoría de los casos. De los datos mostrados en la tabla 1 se concluyó que, este valor no es único sino que depende de la composición de concreto, es decir, la relación agua cemento, tipo de cemento, porosidad, y de las condiciones de exposición (Alonso et al., 2000).

Tabla 1. Tabla de valores para el inicio de la corrosión adaptada de (Alonso et al., 2000).

| Autor | Tipo de Concreto o adición | Umbral de Cloruros | |
|--------------------|--|--------------------|----------------|
| | | Cl libres (%wc) | Total Cl (%wc) |
| Ann y Song | 15% cenizas volantes pulverizadas | | 0.9 |
| | 30% cenizas volantes pulverizadas | | 0.68 |
| | 30% Escorias de alto horno | | 0.97 |
| Gouda y Halaka | Cemento portland ordinario | | 2.42 |
| | Escorias | | 1.21 |
| Pettersson | 80% de humedad relativa | | 0.6-1.8 |
| | 100% de humedad relativa | | 0.5-1.7 |
| Hansson y Sorensen | 50% de humedad relativ | | 0.6-1.4 |
| Gouda y Halaka | Cemento portland ordinario | | 3.04 |
| | Escorias | | 1.01 |
| | Cemento portland ordinario | | 0.6 |
| Kayyali y Haque | Resistencia Media | 1.15 | |
| | Alta Resistencia | 0.85 | |
| | Alta Resistencia con aditivos | 0.8 | |
| | Alta Resistencia con aditivos y cenizas volantes | 0.45 | |
| Hussain et al. | Contenido de C3A=2.43% | 0.14 | 0.35 |
| | Contenido de C3A=7.59% | 0.17 | 0.62 |
| | Contenido de C3A=14.0% | 0.22 | 1 |
| Schiessl y Breit | Cemento Portland Ordinario | | 0.5-1 |
| | Escorias de alto horno | | 1-1.5 |
| | Cenizas Volantes | | 1-1.5 |
| Thomas et al. | Expuesto a ambiente marino | | 0.5 |
| Thomas | Cenizas Volantes 0% | | 0.7 |
| | Cenizas Volantes 15% | | 0.65 |
| | Cenizas Volantes 30% | | 0.5 |
| | Cenizas Volantes 50% | | 0.2 |

Por ello, The American Concrete Institute (ACI) publicación 222R-96 recomienda, para la construcción de nuevas edificaciones, valores límites en la mezcla del concreto de 0.2% de cloruros por peso de cemento para concreto reforzado (CR) en ambientes secos, 0.1 % para CR en ambientes húmedos.

4.4 MODELOS DE TRANSPORTE DE CLORUROS EN EL CONCRETO

Adolph Eugen Fick, 1829-1901, propuso un modelo de difusión de cloruros ya que éste es el fenómeno que predomina en el transporte de cloruros en el concreto. El proceso de difusión es similar al proceso de transferencia de calor en un medio, con base en este comportamiento Eugen Fick propuso las ecuaciones diferenciales que rigen el proceso de difusión (Poulsen et. al., 2006).

Existen diferentes tipos de modelos de transporte de cloruros basados en fenómenos naturales, que dependen de cuál sea el factor predominante en el transporte de los mismos. Entre estos están la Difusión, la convección, la migración y la permeación (Guzman, 2010), que dependen de múltiples factores.

- * Difusión: Para este tipo de modelo prima el transporte de cloruros por diferencias de concentraciones, donde los iones van de mayor a menor concentración. Usualmente modelado usando la primera y segunda ley de Fick que gobiernan este proceso (proceso químico) (Altaf, 2013) (Poulsen et. al., 2006):

$$J = -D * \frac{\partial C}{\partial x} \quad \text{Primera ley de Fick} \quad (1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D(t) * \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \text{Segunda ley de Fick} \quad (2)$$

- * Convección: Para este tipo de modelo prima el transporte de cloruros por la diferencia de humedad en los poros del concreto, ya que los iones se encuentran diluidos en el agua, al haber cambios de humedad habrá cambio en la cantidad de cloruros (proceso Físico) (Gálvez, 2010) (Guzman, 2010).

$$A = C + S\sqrt{t} \quad (3)$$

Donde A es el tiempo asociado a la entrada de agua en (m³/m² ó g/m²), C representa la distorsión inicial y S es la sortividad (este parámetro varía en el concreto normalmente entre 1g/m²s^{1/2} y 10g/m²s^{1/2})

- * Migración: Para este tipo de modelo prima el transporte de cloruros por una diferencia de potencial en el concreto, los iones cloruro son atraídos a zonas de menor potencial (proceso eléctrico). La ecuación que rige este proceso es la ecuación de Nerst generalizada, ya que ésta calcula el coeficiente de difusión aparente del transporte de un ión en un campo magnético (Altaf, 2013)(Zofia et al., 2013):

$$(Da)_i = RT \frac{u}{zF} \quad (4)$$

Donde R es la constante de los gases ideales en J/K.mol, T es la temperatura en K°, F la constante de Faraday 96487 C/mol y z la valencia del ión.

- * Permeación: Para este tipo de modelo prima el transporte de cloruros por una diferencia de presión, los cloruros diluidos en el agua son transportados en zonas saturadas cuando existen diferencias de presión (corrientes marinas, proceso físico). La ecuación que rige este modelo es la ley de Darcy generalizada (Guzmán, 2010):

$$v = -\frac{k}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (5)$$

Donde v es a velocidad aparente de flujo en m/s, k representa la permeabilidad intrínseca del material (m²), μ es la viscosidad del fluido en N.s/m², el signo menos indica que el sentido del flujo es contrario al incremento de la presión.

Como se puede observar, en las diferentes maneras de transportar cloruros existen variables principales para en cada ecuación: la cantidad de cloruros, la distancia recorrida por los iones y el tiempo transcurrido, principalmente. Además, existen también variables secundarias que se asumen constantes o en la experimentación se mantienen constantes en el laboratorio. Dentro de las más relevantes para el caso de la difusión de cloruros en el concreto están el coeficiente de difusión aparente que usualmente se considera constante, sin embargo éste varía con la relación w/c, el curado del concreto, temperatura, entre otras variables (Andrade et al., 2000) (Galvez, 2010).

Estas variables en los modelos son consideradas constantes para darle simplicidad al fenómeno de difusión de cloruros, al igual que la representación simple en una dimensión. El nivel de complejidad en los modelos aumenta conforme se incluyen variables que afecten el proceso y/o se analice varias dimensiones. Para el caso de la difusión, considerar las variaciones del Df cuando cambia la relación agua cemento, la porosidad, la humedad del concreto, implicaría un modelo acoplado que represente tanto el comportamiento de variables secundarias, como el de variables principales.

Desafortunadamente, la realización de un modelo acoplado requiere de resultados de datos experimentales que permitan correlaciones entre las diferentes variables de entrada del fenómeno de difusión de cloruros, lo que implicaría años de experimentación asociada. Un ejemplo simple es el valor de la variable de frontera Cs, que realmente no

permanece constante a lo largo del tiempo, sino que varía con las condiciones de exposición, época del año, temporada, entre otros.

4.5 MODELO DE DIFUSIÓN DE CLORUROS

En cuanto se desea realizar un modelo, se debe tener claro la geometría que se desea modelar, la física que se implementará, los valores de frontera y valores iniciales, las características propias de los materiales. Ya teniendo esta información se procederá a asignar una malla, correr el modelo y extraer resultados (perfil de cloruros principalmente), por último se debe validar el modelo con resultados experimentales.

Enfocándose más al transporte por difusión en estructuras de concreto reforzado, visto en una sola dimensión, Fick propuso una ley general para la difusión de cloruros, como se muestra en la siguiente ecuación el incremento de cloruros en un determinado tiempo es igual al cambio del flujo en una determinada distancia (Poulsen et. al., 2006). Esto se supone para una sola dimensión.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial F}{\partial x} \text{ Ecuación de balance de masa} \quad (6)$$

Fick también propone que por teoría de difusión el flujo de cloruros a través del concreto es directamente proporcional al gradiente de concentración de iones cloruro medidos en una sección (Poulsen et. al., 2006), tal como se muestra en la siguiente ecuación.

$$F = -D \frac{\partial C}{\partial x} \text{ Ecuación de flujo} \quad (1)$$

Donde **D** es el coeficiente de difusión aparente de cloruros, este varía según el tipo de concreto (componentes, edad, ubicación, entre otras) (Ababneh et. al., 2003) (Andrade et al., 2000).

Si combinamos las 2 ecuaciones propuestas por Fick

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \left(-D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (2.2)$$

Asumiendo que el coeficiente de difusión es constante, se obtiene la segunda ley de Fick.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D(t) * \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2)$$

Se ha encontrado que el coeficiente de difusión no puede ser medido directamente, sin embargo se sabe que este depende del tiempo, de la relación w/c, del curado, entre otros (Ababneh et al., 2003). La variable que genera un mayor cambio en el Df es la relación w/c por lo que se puede hacer correlaciones como la propuesta por Nilsson la cual aplica para un tipo de concreto con cemento portland poco resistente a los sulfatos, sin adición de fly ash, silica fume, entre otros, mediante la ecuación (Nilsson L et al., 1997):

$$D_{pex} = 50,000 \exp\left(-\sqrt{\frac{10}{\frac{w}{c}}}\right) \quad (7)$$

Autores como Song et al. (2008), Nilson et al. (1997), Castañeda Valdes et al. (2009), entre otros han planteado otras correlaciones basadas en experimentación. También se puede usar correlaciones de como varia el coeficiente de difusión aparente en el tiempo, tal como lo propuso Takewaka, et al., siendo soportada por observaciones realizadas tiempo después por Magge et al. (Nilsson L et al., 1997). La siguiente ecuación muestra la variación en el tiempo, donde D_a es el coeficiente alcanzado que tendría el concreto cuando la concentración en la superficie es constante, por lo cual no variaría el perfil de cloruros.

$$D_a(t) = D_{aex} \left(\frac{t_{ex}}{t}\right)^\alpha \quad (8)$$

Los modelos matemáticos de penetración y transporte de cloruros, como el Hetek, el Lightcon, el Collepardi, fueron desarrollados basándose en el comportamiento que tenían las mediciones de cloruros en estructuras con el pasar del tiempo. Por ejemplo, el modelo Lightcon considera que ésta variación se puede analizar en 2 tramos, el primero que es el coeficiente de difusión que adquiere un concreto después de su curado, y el segundo es como disminuye el Df en el tiempo (Poulsen et. al., 2010).

Por otra parte, Hetek considera variaciones en la exposición a cloruros. La exposición a cloruros en estructuras marinas tiende a aumentar con el tiempo y por ello éste modelo es usado principalmente para ambientes marinos. Sin embargo, dado que no se tiene una función de exposición con parámetros conocidos del concreto (Poulsen et. al., 2010).

Para los casos en donde se considera el coeficiente de difusión constante se usa el modelo Collepardi, recomendado para estructuras mayores de 20 años, el cual además de considerar el D_f constante, también considera una exposición constante lo cual facilita el análisis de la penetración de cloruros en concreto (Poulsen et. al., 2010). Para la obtención de estos parámetros, D_f y C_s , se usa el método de regresión de un perfil de cloruros obtenido a partir de datos de laboratorio o campo.

Estos modelos se han planteado desde el punto de vista de las variables que influyen en el transporte y/o ingreso de cloruros en concreto, sin embargo, también se ha investigado como es el recorrido de los cloruros alrededor de los agregados, ya que éstos sólo se transportan en los poros y la matriz de concreto, también se han realizado experimentos en concretos saturados (Xi et. al., 1999), donde tuvieron en cuenta la manera como varían la relación agua cemento usado en la mezcla, el tipo de cemento, el tiempo de curado y el tipo de agregado. Con los datos realizaron un modelo donde se diferencia el concreto como la composición de 2 partes, la matriz y los agregados, el modelo mostró que es importante tener en cuenta el recorrido de los cloruros ya que la distancia mostrada en la ecuación de difusión de cloruros no considera rodear agregados, sin embargo, por este motivo se usa el coeficiente de difusión aparente (calculado con datos medidos), dado que no siempre se conocerá la ubicación de los agregados ni el coeficiente de difusión real.

Investigadores como Nilson, Song, Poulsen, entre otros, han realizado recopilaciones de los tipos de modelos de transporte y difusión de cloruros en el concreto, teniendo en cuenta diferentes aspectos como las variables que se pueden generar en cada uno basándose en las leyes de Fick, enunciando los diferentes modelos planteados hasta la fecha: el Hetek, el Lightcon, el Collepardi, utilizando diferentes concentraciones de cloruros, a su vez plantean modelos predictivos en función del tiempo, o en función de la relación w/c y las condiciones de exposición, entre otros (Song et al., 2008), (Nilson et al., 1997), (Castañeda Valdes et al., 2009), (Poulsen et. al., 2010). Sin embargo estos modelos realizados han sido unidimensionales, el efecto de borde aún se está estudiando.

En la tabla 2, se presenta una recopilación de las principales investigaciones revisadas, indicando principales parámetros como la exposición de cloruros, la geometría usada y si realizaron perfil de cloruros y/o evaluaron el umbral de cloruros, lo cual son los principales parámetros de investigación hoy en día.

Los modelos propuestos hacen referencia al concreto como un material homogéneo donde se transportan cloruros, sin embargo se sabe que internamente en la matriz cementante se encuentran diferentes tipos de agregados, los cuales no transportan cloruros de igual forma que la matriz. Por ello existen investigaciones acerca del

transporte de cloruros en concreto heterogéneos un ejemplo de esto es la investigación de Xi et. al. (1999) y el de Yanwei en 2007 que publicó un artículo acerca del modelado de la difusión de cloruros en estructuras de concreto heterogéneas es decir se diferencia la zona donde se encuentran los agregados de la zona donde se encuentra la matriz. Este modelo se realizó por elementos finitos, mostrando resultados donde los cloruros penetran con una velocidad diferente a la que se obtendría con un concreto homogéneo, demostrando la diferencia entre el D_f y el D_{fa} , donde D_{fa} representa el coeficiente de difusión aparente.

El ataque de cloruros se ha estudiado y modelado no sólo en diferentes tipos de concreto sino también en diferentes morteros y pastas cementantes, las cuales cumplen funciones similares a las del recubrimiento (Jensen et al, 1999), los modelos en este caso, consideran la difusión en un solo material empleando las leyes de Fick. Los perfiles de cloruros arrojados son muy similares a los obtenidos en la experimentación de muestras sometidas a agua de mar sintética, por alrededor de 6 meses. La única diferencia relevante es el coeficiente de difusión usado en el modelo, ya que usualmente es mayor para morteros.

Tabla 2. Recopilación de investigaciones de transporte de cloruros (experimentación y modelos)

| Autores | Fecha | Exposición | | Geometría (cm) | | | | CL Profile | threshold |
|---------------------------|-------|---------------------------------|-------------------------------|----------------|------|-----------|--------|------------|-----------|
| | | % chloride solution | % sodium chloride solution | Losa | Viga | Cilindros | Prisma | | |
| Liu y Weyers | 1997 | 5% | 8.24% | X | | | | x | |
| Nelson | 1998 | 17kg / m ³ | | | X | | | x | |
| Jensen et al. | 1999 | | 0.48%, 1.12%, 3.12% | | | | x | | x |
| Xi y Bažant | 1999 | | 3% | | | | | | |
| Alonso et al. | 2000 | | | | | X | | | |
| Andrade y Kropp | 2000 | 3.5kg/m ³ en puentes | 2.5M y 6.08 kg/m ³ | | | X | | x | x |
| Glass et al. | 2000 | | 4M | | | | | | |
| Galvez Ruiz | 2002 | | | | | | | | x |
| Ababneh | 2003 | | 3% | | | X | | x | |
| Torres Acosta et al. | 2006 | | | X | | | x | x | |
| Schueremans et al. | 2007 | | 7% | | | X | | x | |
| Zeng | 2007 | | 3.30% | | | | | x | x |
| Song et al. | 2008 | | | | | | x | | |
| Lizarazo et al. | 2009 | | | | | | | | x |
| Ali | 2010 | | 10% | | | X | | X | |
| Poulsen y Meljbro | 2010 | 2.2% Cs=7%, CT=0.7% | | | | X | | x | x |
| Göran | 2011 | 1.66-6.45% | | | | | | | |
| Villagrán Zaccardi y Taus | 2011 | | 11.1 kg/m ³ | | | X | | | |
| Rahman et al. | 2012 | 1-2% | | | | | X | | |
| Nilson et al. | 2013 | | 5% | | | | | | |
| Tejada Tovar et al. | 2013 | | | | | | X | x | |

El fenómeno de difusión de cloruros desencadena otro fenómeno llamado corrosión, como ya se ha mencionado anteriormente, dada la importancia de esta temática se ha recopilado información resultado de varias investigaciones con el fin de estar actualizados en los avances sobre el comportamiento de los cloruros en el concreto (RILEM, 2000), (Poulsen et. al., 2010), (ACI Committee 222, 2001), dichas recopilaciones son útiles al momento de seleccionar los parámetros que se ingresaran al modelo, ya que se busca que éste represente lo mejor posible una situación real, es decir, parámetros comunes para las estructuras. Adicionalmente se puede ajustar la normatividad y establecer los límites de cloruros en el concreto como un % por peso de cemento basándose en el nivel crítico de cloruros.

Éstas recopilaciones datan del último siglo, ya que en éste se ha aumentado el interés por este tipo de investigaciones, han mostrado principalmente en estructuras de concreto reforzado daños que se presentaban internamente en elementos estructurales que inicialmente se notaban con grietas en los muros de concreto, y después pérdida en el recubrimiento del acero por la expansión volumétrica que genera este fenómeno (Torres-Acosta et. al., 2006). Un ejemplo de parámetros típicos es para la exposición (C_s), valores entre 0.48% y 10% wc usados por Jensen et al. (1999) y Ali (2010) respectivamente, o valores de umbral de cloruros entre 0.2% y 3.4% wc (ver Tabla 1).

Teniendo en cuenta estos avances en el conocimiento, se realizará un modelo de ingreso y transporte de cloruros con parámetros dentro del rango encontrado en la literatura con el fin que pueda representar cualquier tipo de estructura sometida a un ataque de cloruros. El modelo usara las leyes de Fick y considerara al concreto como un material homogéneo con una velocidad de ingreso de cloruros D_a (Difusión aparente).

4.5.1 Solución numérica de las leyes de Fick

En el desarrollo del modelo, se plantean las ecuaciones de Fick como una ecuación diferencial con los valores de frontera y valores iniciales de contenido de cloruros como se muestra a continuación.

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} & x > 0, t > 0 \\ C(0, t) = C_s(t) & t > 0 \\ C(x, 0) = 0 & x > 0 \end{cases}$$

Para la solución de esta ecuación diferencial parcial se plantea matemáticamente la no difusividad como única solución. (Frederiksen et al.,2009)

$$C(x,t) = -2 \int_0^t \frac{\partial K}{\partial x}(x,t-T)Cs(T)dT \quad , \quad x > 0, \quad t > 0 \quad (9)$$

Dónde:

$$K(x,t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4t}\right) \quad , \quad t > 0. \quad x \in R \quad (10)$$

Luego la solución sería:

$$C(x,t) = \frac{x}{2\sqrt{\pi t}} \int_0^t \frac{1}{T\sqrt{T}} Cs(t-T) \exp\left(-\frac{x^2}{4t}\right) dT \quad , \quad t > 0. \quad x \in R \quad (11)$$

Sin embargo, en la práctica no se resuelve la integral anteriormente mostrada para aplicaciones. Para ello Crank plantea que sólo puede ser resuelta numéricamente cuando (Crank, 1975):

$$C_{s,0}(t) = C_{s,0}, \quad C_{s,1/2}(t) = C_{s,1/2}\sqrt{t}, \quad C_{s,1}(t) = C_{s,1}t$$

Que sólo puede ser escrito como

$$C_{s,p}(t) = C_{s,p}t^p \quad p \in \left(0, \frac{1}{2}, 1\right)$$

Donde p es una variable aleatoria que varía entre 0,1/2 y 1, luego se puede aplicar para todo $2p \in N$. Para el caso particular donde $p=0$ y $C_{s,0}(t) = C_{s,0}$ se obtiene una solución particular llamada función error complementaria graficada en la Figura 2.

$$C(x,t) = C_{s,0} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{t}}\right) \quad (12)$$

Donde la función error complementaria es:

$$\begin{aligned} \operatorname{erfc}(z) &= 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-u^2) du = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_z^\infty \exp(-u^2) du \\ &= 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)n!} z^{2n+1} \end{aligned} \quad (13)$$

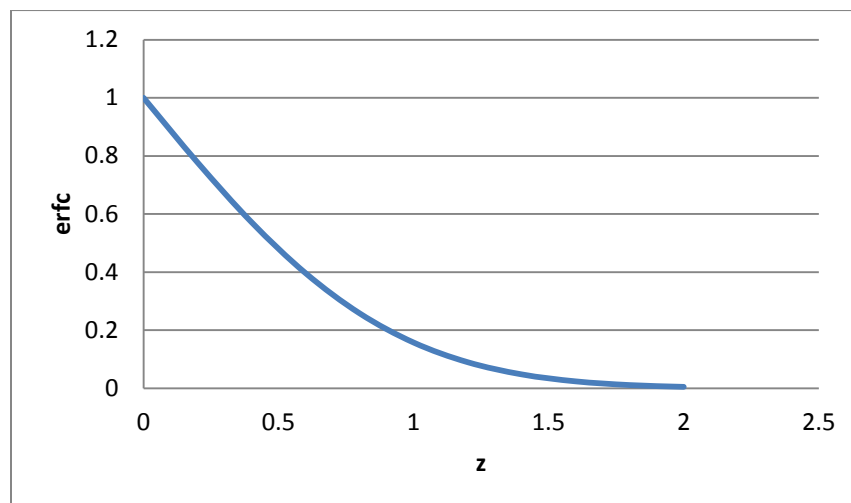


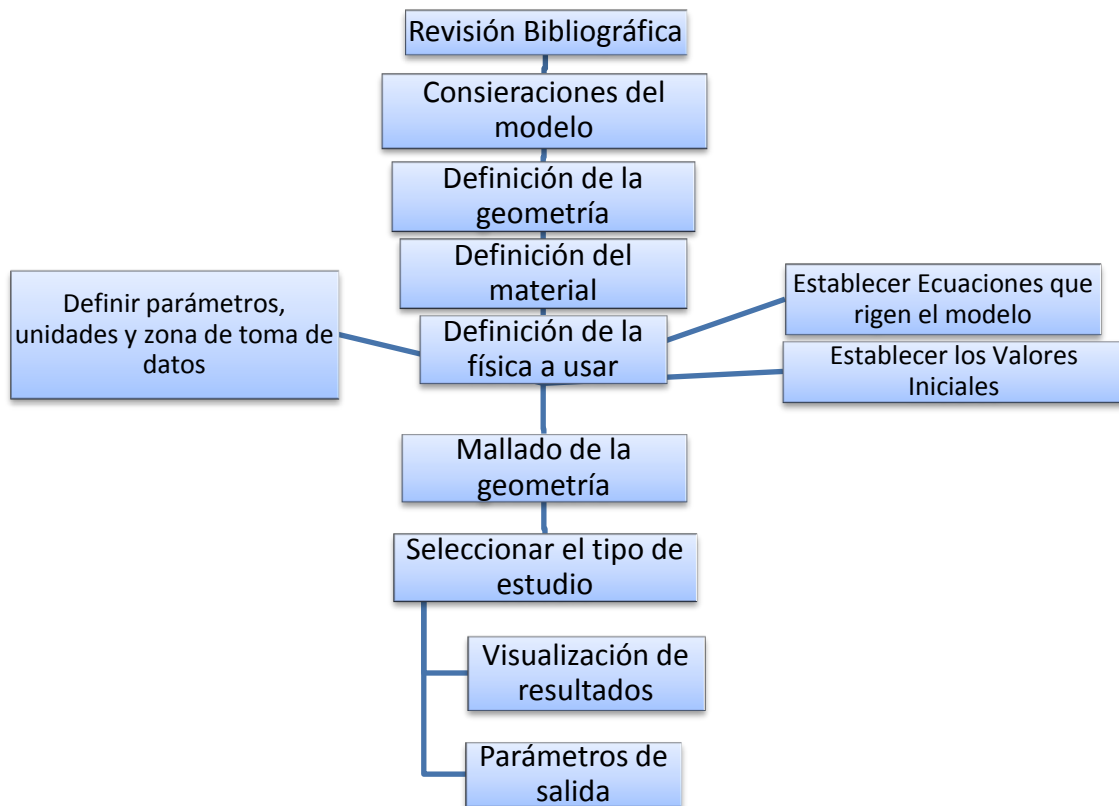
Figura 2. Gráfica de la función error complementaria

En la presenta investigación, los contenidos de cloruros obtenidos experimentalmente a partir de polvo extraído de probetas sumergidas, después de un cierto periodo de inmersión de 12, 55, 76 y 81 días en una solución de 1M de NaCl, se someterán a un análisis de regresión siguiendo la ecuación de Fick para transporte de cloruros en una dimensión, y así obtener parámetros como el D_f aparente, el C_s y el C_o basándonos en la solución anteriormente mostrada (Ecuación 13).

5. METODOLOGÍA

En este capítulo se muestran los pasos realizados durante esta investigación los cuales son nombrados a continuación. Para el modelo de penetración de cloruros se usará el software Comsol Multiphysics®, en el cual se seleccionarán las ecuaciones de Fick y se obtendrá los perfiles de cloruros en una y dos dimensiones según la geometría establecida. De la revisión del estado del arte, se determinó que el modelo se planteará asumiendo que el concreto es un material homogéneo en el cual se usará el coeficiente de difusión aparente, la exposición superficial y el contenido inicial de cloruros constante.

En el siguiente diagrama de flujo se pueden apreciar las diferentes fases de la metodología empleada en esta investigación, las cuales son presentadas con mayor detalle más adelante:



5.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Se realizó una revisión de la literatura basándose principalmente en teoría de la difusión de cloruros en la matriz de concreto, modelos usados, variables que predominan el fenómeno, avances sobre su comportamiento, entre otros. Igualmente se investigó que tipo de características se han usado en los modelos: geometrías, exposición a cloruros, recubrimientos, y tipos de concreto o mortero con diferentes relaciones w/c. Esta revisión fue realizada con el fin de establecer los intervalos comunes para cada una de las variables del modelo, y así poder realizar gráficas que puedan ser usadas en cualquier tipo de concreto cuyo D_f se encuentre entre $1 \text{ E-}12$ y $1 \text{ E-}11 \text{ m}^2/\text{s}$.

5.2 CONSIDERACIONES DEL MODELO

Para la generación del modelo se toman las siguientes consideraciones:

- Se supone que en el proceso de daño de la capa pasiva del acero del hormigón armado intervienen los cloruros totales.
- Se asume que el único medio de transporte del ión cloruro es por difusión.
- Se considera una geometría cuadrada que representara el fenómeno en 1D y 2D dependiendo de los valores de frontera.
- Se asume que el hormigón es un material homogéneo.
- La actividad del ión cloruro y la temperatura se mantienen constantes con el tiempo y se despreciaron los efectos de la carbonatación.
- Se asume que en los modelos tanto las grietas como acero y agregado, no interactúan con los cloruros, sino que son rodeados por los mismos.

5.3 DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA

Para la definición de la geometría se plantean diferentes prototipos con el fin de evaluar el efecto que tiene el espesor de recubrimiento (x), resultando en un mayor recorrido de los cloruros generado por la ubicación de agregados en la matriz de concreto, dado que los cloruros deben rodearlos para alcanzar la superficie del acero. Para esto se proponen 4 modelos geoméricamente diferentes que representan situaciones reales de las estructuras: una sección agrietada, una losa uniforme que incluye el efecto de borde, una

sección de losa intermedia que desprecia el efecto de borde y una sección de losa donde se discrimina el agregado.

El recubrimiento se evalúa como parámetro variable y que va directamente asociado a la durabilidad de la estructura. En el modelo se analiza la distancia de penetración del ión cloruro, de 1 cm a 10 cm, el caso más crítico representará una situación cotidiana donde el acero no presenta el recubrimiento de diseño, y la situación ideal donde el acero presenta el recubrimiento adecuado. Éste es uno de los parámetros más importantes en lo que respecta a la durabilidad de una estructura (NSR-10). En la Figura 4 se ilustran los diferentes modelos analizados.

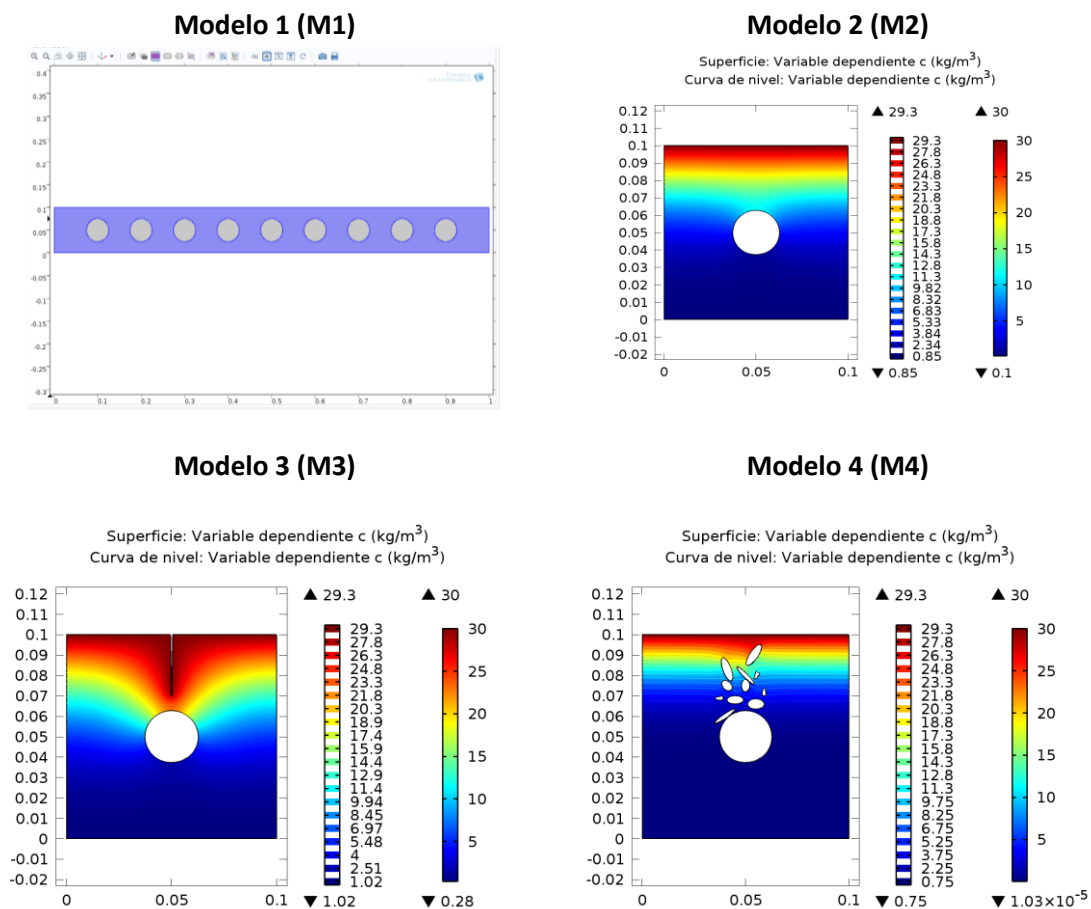


Figura 3. Definición de la geometría del modelo

Para el **M1** se propuso analizar inicialmente el fenómeno que ocurre en losas de concreto representando el caso de ingreso de cloruros provenientes de sales de deshielo, que se presenta principalmente en tableros de puentes y edificios de parqueaderos. La losa será de dos metros (2 m) donde las esquinas sufren el efecto de borde por ingreso de cloruros en 2 direcciones mientras que la zona central sólo se ve afectada por el ingreso unidireccional; el espesor de la losa será de 10 cm y tendrá acero de refuerzo en el eje de la losa de 1" de diámetro.

El **M2** es una representación simplificada porque se está asumiendo transporte en una sola dirección en la zona central de la losa.

El **M3** considera una grieta de 3 cm de profundidad y 1 mm de ancho en la superficie, en la cual ingresan los cloruros del ambiente más rápidamente y de ésta manera cambia el mecanismo de ingreso de cloruros en el concreto.

El **M4** simula el posible efecto que pueden tener los agregados en la matriz de concreto. Se emplearon agregados de diferentes geometrías (cantos rodados y triturados) y seleccionando un tamaño máximo de agregado de 3/8".

Se realizaron corridas en el modelo para cada uno de los casos y de acuerdo a los resultados, se seleccionó como geometría definitiva al **M2** ya que para una estructura es impredecible conocer la ubicación exacta de los agregados, adicionalmente a esto el modelo seleccionado representa el coeficiente de difusión aparente el cual se considera para toda la matriz uniforme, por lo que se descarta el **M4**, y la generación de una grieta puede darse por diferentes fenómenos (cargas, temperatura, tensión, retracción por secado, corrosión, entre otras) el cual no es incluido en el estudio realizado lo cual descarta el **M3**. Para el caso de la losa **M2** al combinar los fenómenos de ingreso en una dirección (la zona central) y 2 direcciones (la zona de borde), se prefiere realizar el análisis independiente de los fenómenos.

El modelo seleccionado puede usarse para diferentes representaciones dependiendo de las condiciones de frontera, que representará casos de estructuras en contacto constante con agua de mar, o sales del deshielo. Si la penetración y transporte de cloruros se realiza en una sola cara, en una sola dirección, puede representar la losa uniforme que depreciará el efecto de borde. Si la penetración y transporte se considera en dos caras, dos direcciones, puede representar el comportamiento que se da en una esquina de vigas o columnas, considerando de este manera el efecto de borde, el cual es uno de los objetivos de la presente investigación.

5.4 DEFINICIÓN DE LOS MATERIALES

Inicialmente se realiza una definición de los materiales a usar y sus características. Se usará concreto reforzado. Un concreto con una relación W/C de 0.6 con un factor cemento de 400 Kg/m³. Se emplea la caracterización tipo del software mostrada en la Figura 4 para el caso del concreto de 21 MPa, igualmente los parámetros pueden asignarse para cualquier tipo de concreto o material cementante.

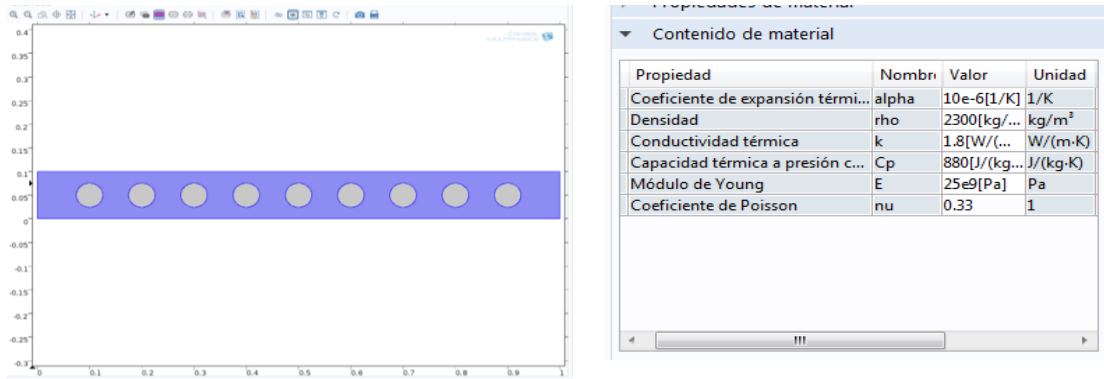


Figura 4. Definición de Características del Concreto

La asignación de estos parámetros se realizó en todos los modelos.

5.5 DEFINICIÓN DE LA FÍSICA, VARIABLES Y ECUACIONES A USAR

El modelo a desarrollar considera que el transporte de cloruros obedece principalmente al fenómeno de difusión, de esta manera se pueden determinar los perfiles de cloruros a diferentes tiempos t_i que permitirán predecir el tiempo de inicio de la corrosión. Este caso obedece a la situación en que el nivel de cloruros totales supere el umbral de cloruros. En el desarrollo del modelo se considera al concreto como un material homogéneo, con poros distribuidos de manera uniforme por lo cual las ecuaciones que dominan el modelo se usan para toda la matriz, el resto de características se asumirán constantes y sin correlación directa teniendo en cuenta el modelo **M2**.

Las variables a usar en el modelo serán:

- La distancia desde la cara del concreto expuesta a cloruros: X_i
- El tiempo transcurrido después de iniciarse la exposición: T_i

- El contenido de cloruros en el concreto expresado como %wc, a una determinada distancia en un determinado tiempo: $C(x, t)$

Los datos de entrada serán:

- El recubrimiento del acero de refuerzo: X
- El contenido de cloruros en la superficie: $C(0, t)$
- El contenido de cloruros inicial en la matriz de concreto: $C(x, 0)$
- Coeficiente de difusión de cloruros aproximado: Df_a

Los datos de entrada son obtenidos a partir de perfiles de cloruro reportados por Roa-Rodríguez et al., con el fin de comparar los resultados de su modelo en el cual el Cs es de 3.68 %wc y el coeficiente de difusión a partir del perfil de cloruros fue de 1.46 cm²/año.

Las ecuaciones usadas en el modelo son la primera y segunda Ley de Fick haciendo referencia a la Ecuación (1) y (6), al igual que la solución numérica de la ecuación diferencial:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial F}{\partial x} \text{ Ecuación de balance de masa}$$

$$F = -Df \frac{\partial C}{\partial x} \text{ Ecuación de flujo}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = Df \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

$$C(x, t) = C(0, t) - (C(0, t) - C(x, 0)) \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Df * t}}\right) \text{ Solución numérica (14)}$$

$$da \frac{\partial C \text{ libras}}{\partial t} + \Delta(-c \Delta C \text{ libras}) + \beta \nabla C \text{ libras} = F \text{ Ecuación comsol (15)}$$

Dónde:

$C \text{ libras}$: Cantidad de cloruros en un diferencial de concreto

β : Coeficiente de convección de Cl en concreto

F : Acumulación de Cl en el diferencial de concreto

Dado que el modelo plantea únicamente el fenómeno de difusión, β se anula de la Ecuación (15). Por otra parte, se considera que los cloruros en el concreto son

transportados en su totalidad (no hay fijación), por lo tanto no se acumulan, es decir, F se anula.

$$da \frac{\partial C \text{ libres}}{\partial t} - (c \Delta^2 C \text{ libres}) = 0$$

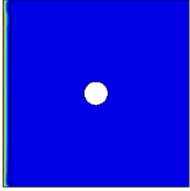
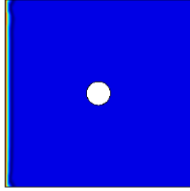
$$\frac{\partial C \text{ libres}}{\partial t} = \frac{c}{da} \Delta^2 C \text{ libres}$$

$$\frac{c}{da} = Df$$

Por lo tanto, se cumple la ley de Fick para el transporte de cloruros en el concreto por difusión. Adicionalmente en Comsol Multiphysics® “c” es adimensional con unidades de [T]/[L]^2 lo cual hace dimensionalmente consistente la expresión para Df.

Se seleccionaron las condiciones de frontera mostradas en la **Tabla 3** a usar en el modelo con transporte en una dirección y en 2 direcciones.

Tabla 3. Asignación de valores de frontera

| Modelo 1D | | | Modelo 2D | | |
|-----------|---|-------------------------------------|-----------|---|-------------------------------------|
| | $\frac{\partial C}{\partial x} = 0$ | | | $\frac{\partial C}{\partial x} = 0$ | |
| C = 3.68% |  | $\frac{\partial C}{\partial x} = 0$ | C = 3.68% |  | $\frac{\partial C}{\partial x} = 0$ |
| | $\frac{\partial C}{\partial x} = 0$ | | | C = 3.68% | |

5.6 MALLADO DEL MODELO

El mallado empleado en el modelo corresponde a elementos triangulares según las especificaciones mostradas en la Tabla 4.

Tabla 4. Distribución de mallado del modelo

| Propiedad | Valor |
|---------------------------|--------|
| Elementos triangulares | 740 |
| Elementos de arista | 84 |
| Elementos de vértice | 8 |
| Tamaño máximo de elemento | 0.0134 |
| Tamaño mínimo de elemento | 6.0E-5 |
| Factor de curvatura | 0.3 |

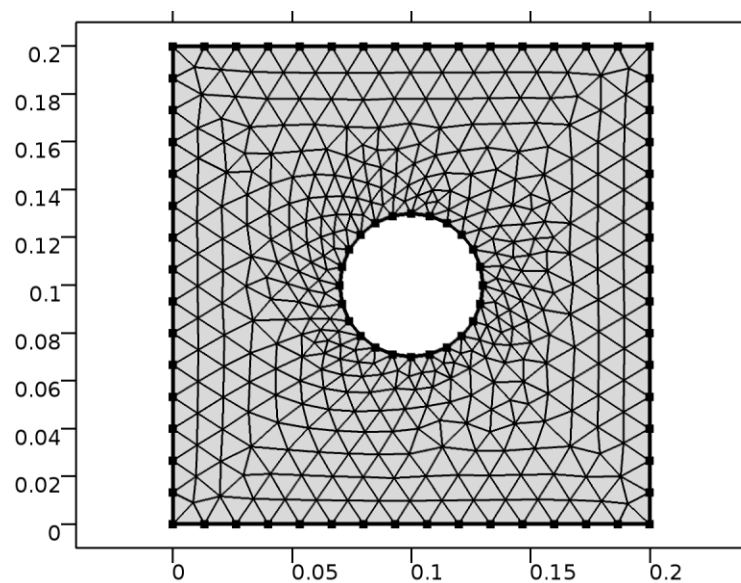


Figura 5. Mallado de la geometría

Se selecciona un mallado fino para el modelo, con el fin de tener resultados precisos al momento de obtener el perfil de cloruros. Al emplear mallados superiores no se apreciaba una diferencia considerable en los datos de salida. Se realizó convergencia de mallas con el fin de evitar posibles errores por elementos finitos cercanos a cero.

Se puede observar en la Figura 5, que los elementos del mallado son variables debido a que se ajustan a la geometría planteada. Para cumplir este requerimiento, al acercarse a

la región circular (zona donde se ubica el acero de refuerzo), el tamaño del mayado es mucho menor que en las caras externas.

El mallado usado para el modelo de transporte de cloruros en una dirección, fue el mismo que para el modelo que incluye el transporte en 2 direcciones.

6. RESULTADOS

De acuerdo a los modelos propuestos se realizó un perfil de cloruros para cada caso planteado como se muestra en la Figura 6. El perfil de cloruros para la geometría correspondiente a **M3**, muestra un contenido de cloruros superior en la interfaz acero-concreto producto de la generación de la grieta, dado que se disminuye el recubrimiento efectivo, facilitando así el ingreso de cloruros desde la superficie. Se muestra adicionalmente en **M3** el efecto que tiene una grieta en el perfil de cloruros, partiendo que la grieta se encuentra a una distancia horizontal de 0.1 m. Los perfiles de cloruros extraídos del modelo de la grieta se obtuvieron a 7, 8, 9 y 10 cm como se muestra en la Figura 8, lo cual muestra que a medida que el perfil se acerca a la grieta se torna más elevado el contenido de cloruros.

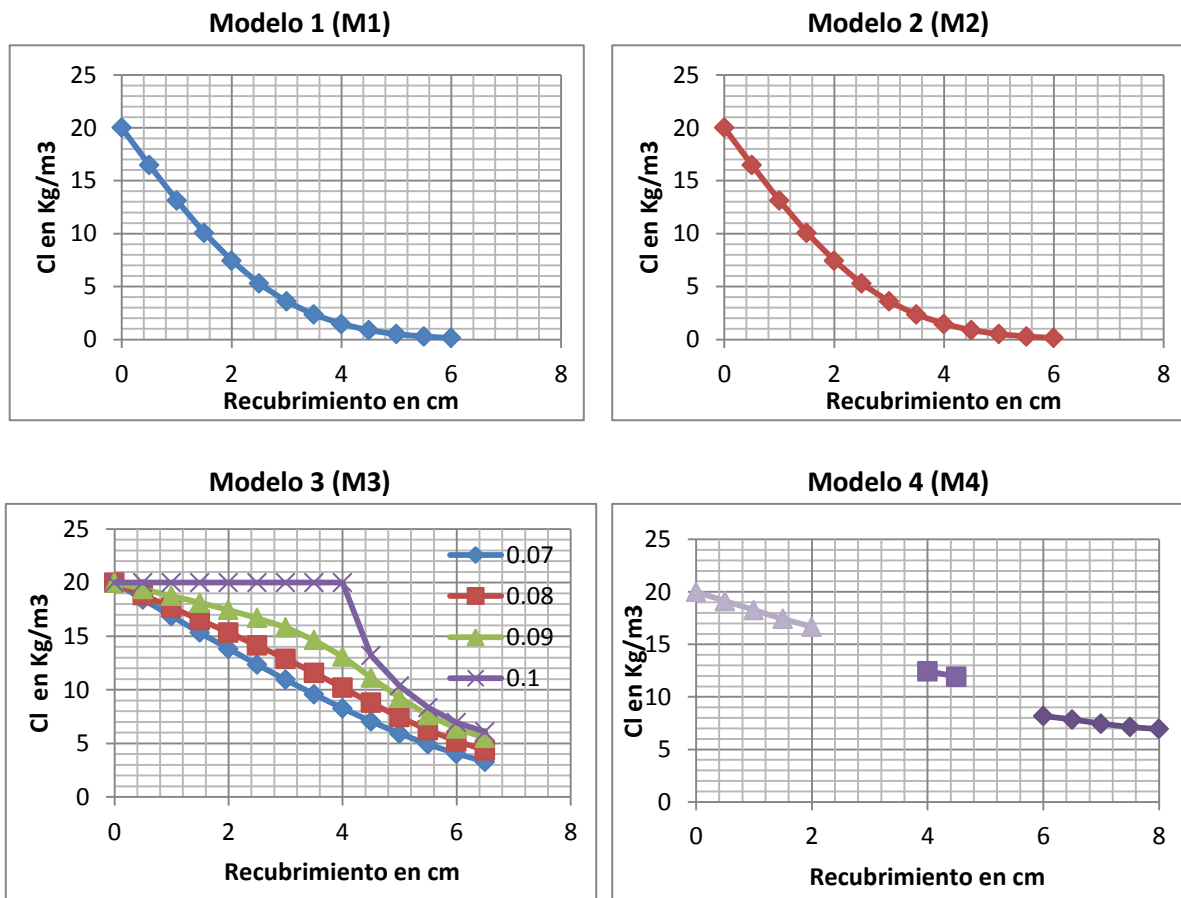


Figura 6. Perfiles de cloruros para los prototipos M1, M2, M3 y M4

Por otra parte, se observa que en las zonas laterales de la grieta se asocia un transporte de cloruros en dirección horizontal, por lo que para dicha zona se podría emplear un modelo de penetración de cloruros en 2 dimensiones. Yang et al. (2012) reporta estudios de modelos de penetración de cloruros en concretos fisurados, obteniendo una sección transversal similar a **M3**. Este autor adicionalmente simula el agregado y evidencia la nula actividad que hay entre el agregado y los cloruros en el concreto, lo cual muestra el mismo comportamiento que **M4**, es decir, los agregados no tienen participación en el transporte de cloruros, estos representan un obstáculo que debe ser rodeado por éstos durante el transporte. El perfil de cloruros de la geometría **M2**, que se observa en la Figura 7, es el que mejor representa el ingreso de cloruros en un concreto uniforme, su perfil de cloruros es similar a los datos teóricos, por tanto se aprecia la funcionalidad para los casos estudiados a continuación con difusión en una y dos dimensiones.

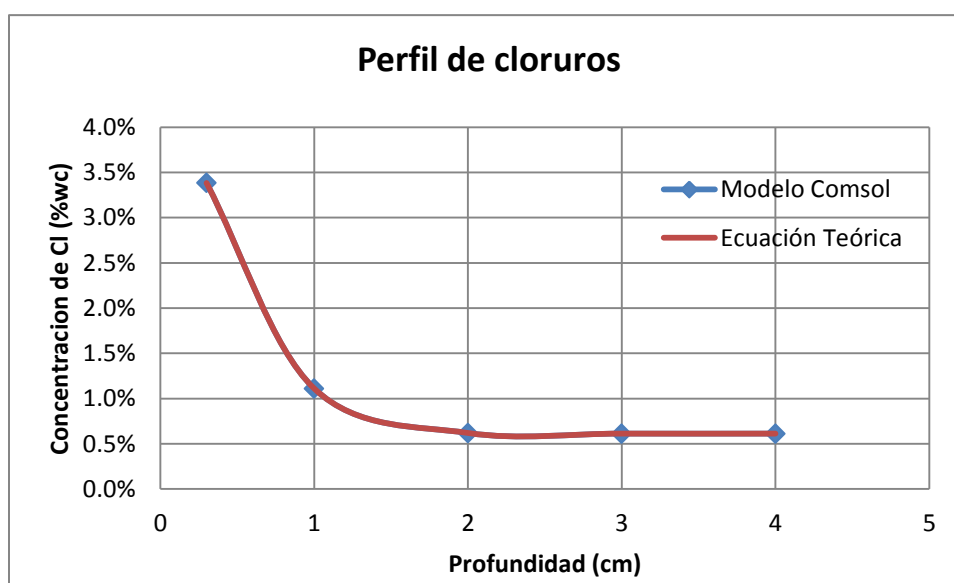


Figura 7. Gráfica de datos teóricos vs modelo

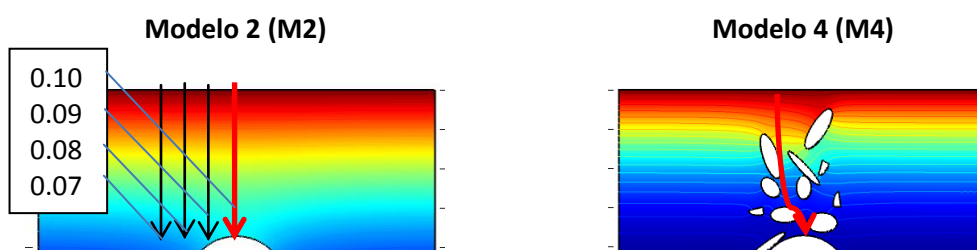


Figura 8. Comparación de la trayectoria recorrida por el ión cloruro M2-M4

El perfil de cloruros para el caso de la geometría **M4**, muestra una disminución considerable en el contenido de cloruros a un determinado tiempo. En este caso, dada la presencia de diferentes agregados, que no interactúan con los iones cloruro, la trayectoria hasta la interfaz concreto-acero aumenta. Esta situación también ha sido contemplada por Villagrán (2011) obteniendo efectos similares al simular agregados en la matriz del concreto expuesto a cloruros. Esta diferencia es asumida en los modelos por el coeficiente de difusión aparente, ya que contempla al concreto como un material uniforme.

Dentro de los resultados que se obtuvieron mediante el modelo se encuentra:

- Se puede ajustar la geometría ya definida para evaluar el comportamiento de una estructura de concreto reforzado frente a la exposición de cloruros.
- Con los resultados numéricos del modelo se puede obtener el perfil de cloruros en la matriz de concreto después de un determinado tiempo.
- El contenido de cloruros a una determinada profundidad de recubrimiento puede ser usado para compararlo con el nivel máximo permisible según normativas (NSR-10) o el umbral de cloruros.

6.1 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS EN TÉRMINOS DE DURABILIDAD

Debido a que el umbral de cloruros es el punto determinante en cuestión de durabilidad para la corrosión y adicionalmente es un valor cambiante dependiendo de las condiciones en las que se encuentre el acero de refuerzo, se considera que varía usando una distribución normal (Tomati et al. 2011). Por lo tanto, se realizó un análisis estadístico para un valor probable de umbral de cloruros, y con base en éste valor, establecer curvas de probabilidad de inicio de corrosión para varios escenarios de aplicación (por ejemplo variando el recubrimiento y el tiempo).

6.1.1 Análisis estadístico del umbral de cloruros

Basándose en la recopilación de datos de la literatura correspondientes al valor umbral de cloruros que se muestran en la Tabla 1 (Umbral de cloruros totales %wc), se obtiene como datos de tendencia central y variabilidad los mostrados en la Tabla 5:

Tabla 5. Datos de tendencia central y variabilidad del umbral de cloruros

| <i>Umbral de cloruros (Cl totales %wc)</i> | |
|--|------------|
| Media | 1.01842105 |
| Error típico | 0.1579534 |
| Mediana | 1 |
| Moda | 1 |
| Desviación estándar | 0.68850291 |
| Varianza de la muestra | 0.47403626 |
| Curtosis | 3.83574583 |
| Coeficiente de asimetría | 1.84344403 |
| Rango | 2.84 |
| Mínimo | 0.2 |
| Máximo | 3.04 |
| Suma | 19.35 |
| Cuenta | 19 |
| Nivel de confianza (95.0%) | 0.33184778 |

El promedio de la columna de Cloruros Libres de la Tabla 5 es de 1.0184% por peso de cemento, muy cercano al valor límite de 1% propuesto por Tejada et al. (2013). Así mismo, en el Reglamento Colombiano Sismo Resistente NSR-10 se limita la cantidad de cloruros, para estructuras nuevas, en mezclas de concreto reforzado a 1%wc como se indica en el capítulo C.4 correspondiente a requisitos de durabilidad.

Usando los valores de la Tabla 5, se calculó los contenidos de cloruros para los cuales se obtendrá un 10, 20, 30, 40 y 50 % de posibilidad de inicio de la corrosión, definido como el momento en que el contenido de cloruros al nivel del acero de refuerzo sobrepasa del valor del umbral (1.02%). Según la distribución normal los valores correspondientes para los porcentajes son los mostrados en la Tabla 6.

Tabla 6. Correspondencia de probabilidad inicio de corrosión vs Cl% wc y Kg/m³ en un concreto de 400 Kg de cemento/m³

| Probabilidad de inicio de corrosión | Cl totales % wc | Cl totales Kg/m ³ |
|-------------------------------------|-----------------|------------------------------|
| 0.1 | 0.1361 | 0.5444 |
| 0.2 | 0.439 | 1.756 |
| 0.3 | 0.6574 | 2.6296 |
| 0.4 | 0.844 | 3.376 |
| 0.5 | 1.0184 | 4.0736 |

En la Figura 9, se muestra la distribución acumulada de probabilidad de inicio de corrosión a partir del umbral de cloruros. La gráfica relaciona el contenido de cloruros con la probabilidad de alcanzar el umbral y dar inicio a la corrosión según el análisis estadístico realizado.

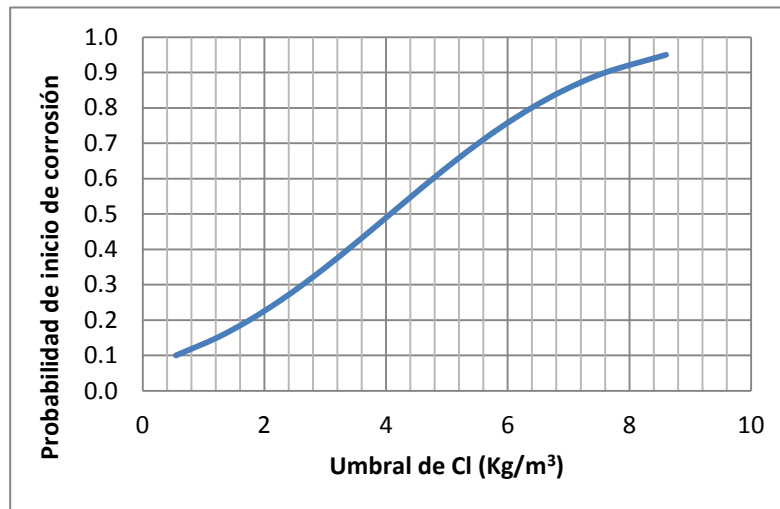


Figura 9. Probabilidad de umbral de cloruros

6.1.2 Curvas de probabilidad de inicio de corrosión

Conociendo como varía el contenido de cloruros a medida que cambia el recubrimiento, la exposición y el coeficiente de difusión aparente, se puede aplicar el modelo para predicciones de inicio de corrosión. Para el perfil de cloruros mostrado en la Figura 10 se determina para que condiciones de recubrimiento se daría inicio a la corrosión teniendo en cuenta que para el modelo se usó una exposición de 3.68 %wc y un coeficiente de difusión de $1.46 \text{ cm}^2/\text{año}$ obtenido a partir de los datos de concretos con 0.65 w/c de Roa-Rodríguez et al. (2013), variando el tiempo de exposición del concreto cada 5 años en la situación modelada.

Estas curvas pueden ser usadas para proyectar el uso de recubrimientos de concreto teniendo en cuenta su durabilidad, e igualmente pueden ser usadas para mantenimientos preventivos a diferentes elementos estructurales de concreto reforzado en condiciones similares a las simuladas en la presente investigación.

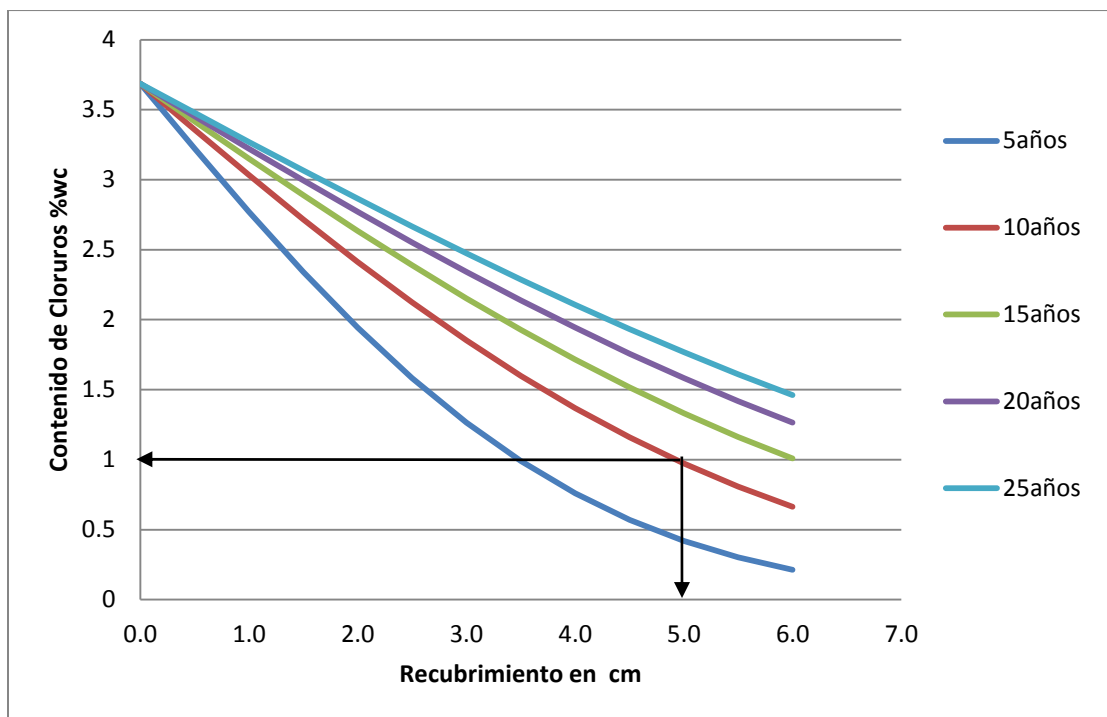


Figura 10. Estimación de recubrimiento para el inicio de la corrosión

Relacionando el contenido de cloruros encontrado en una muestra obtenida de un elemento en la interface acero-concreto, se puede analizar la probabilidad de inicio de corrosión como se muestra en la Figura 10. Evidentemente, la intersección del contenido de cloruros correspondiente con el umbral crítico, proporciona la distancia desde la superficie donde probablemente empezará la corrosión para cada uno de los tiempos. Considerando el caso de las estructuras de concreto reforzado, que comúnmente poseen un recubrimiento de 5cm, se puede evidenciar de la Figura 9Figura 10 que al transcurrir 10 años el contenido de cloruros en la superficie del acero sería de 1% wc, en otras palabras como se muestra en la Tabla 6, esto corresponde a menos del 50% de probabilidad de inicio de corrosión. Por lo tanto, una estructura con las características del concreto evaluado tendría un inicio de corrosión probable del 50% en 10 años. Dicha probabilidad indica que en alguna zona el acero de refuerzo se ha despasivado y ha comenzado la corrosión, a este fenómeno se le llama corrosión por picaduras (Torres Acosta et al., 2006).

Este tipo de predicción se puede realizar mediante la determinación in situ de los parámetros requeridos por el modelo, primordialmente el coeficiente de difusión del concreto y la exposición (o concentración de cloruros en la superficie del concreto), los cuales se pueden obtener ajustando los datos del perfil de cloruros a la ecuación de Fick, tal como se muestra en la validación del modelo (Capítulo 457). Sin embargo, ésta

predicción es más aproximada a geometrías que desprecien el efecto de borde, es decir cuando el transporte de cloruros se da unidimensionalmente, por ejemplo: losas de concreto en parqueaderos o tableros de puentes, muros de concreto, entre otros.

En la Figura 11, se presenta gráficamente la relación que hay entre el contenido de cloruros (en Kg/m^3) en el tiempo, a un recubrimiento de $X = 5 \text{ cm}$ y una exposición de $C_s = 8 \text{ Kg/m}^3$, para diferentes coeficientes de difusión del concreto o material cementante

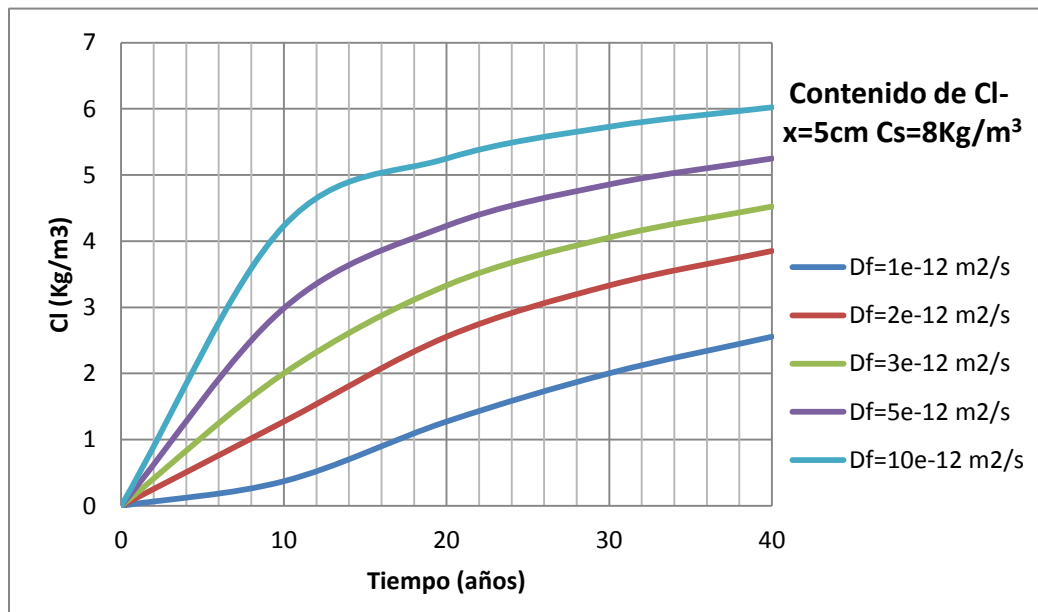


Figura 11. Contenido de Cloruros en la superficie del acero vs tiempo

Para estructuras como muros y losas de concreto cuyo D_f se encuentre en el intervalo mostrado en la Figura 12, se puede analizar cuál sería la probabilidad de inicio de corrosión y según la Figura 9 obtener el umbral de cloruros para dicha probabilidad.

En las gráficas de la Figura 12 se presenta un análisis de la probabilidad para el tiempo de inicio de la corrosión considerando condiciones de exposición típicas de estructuras en estos ambientes. Este punto de inicio de corrosión también ha sido analizado en el modelo de Tuutti (1982) (Nelson, 2013). Para usar estas gráficas se debe conocer el grado de exposición, el coeficiente de difusión del concreto de la estructura, el tiempo de la estructura y el recubrimiento del acero, con el fin de predecir el inicio de la corrosión (t_i) y de esta manera se puedan planificar mantenimientos preventivos a las estructuras afectadas por las entidades encargadas.

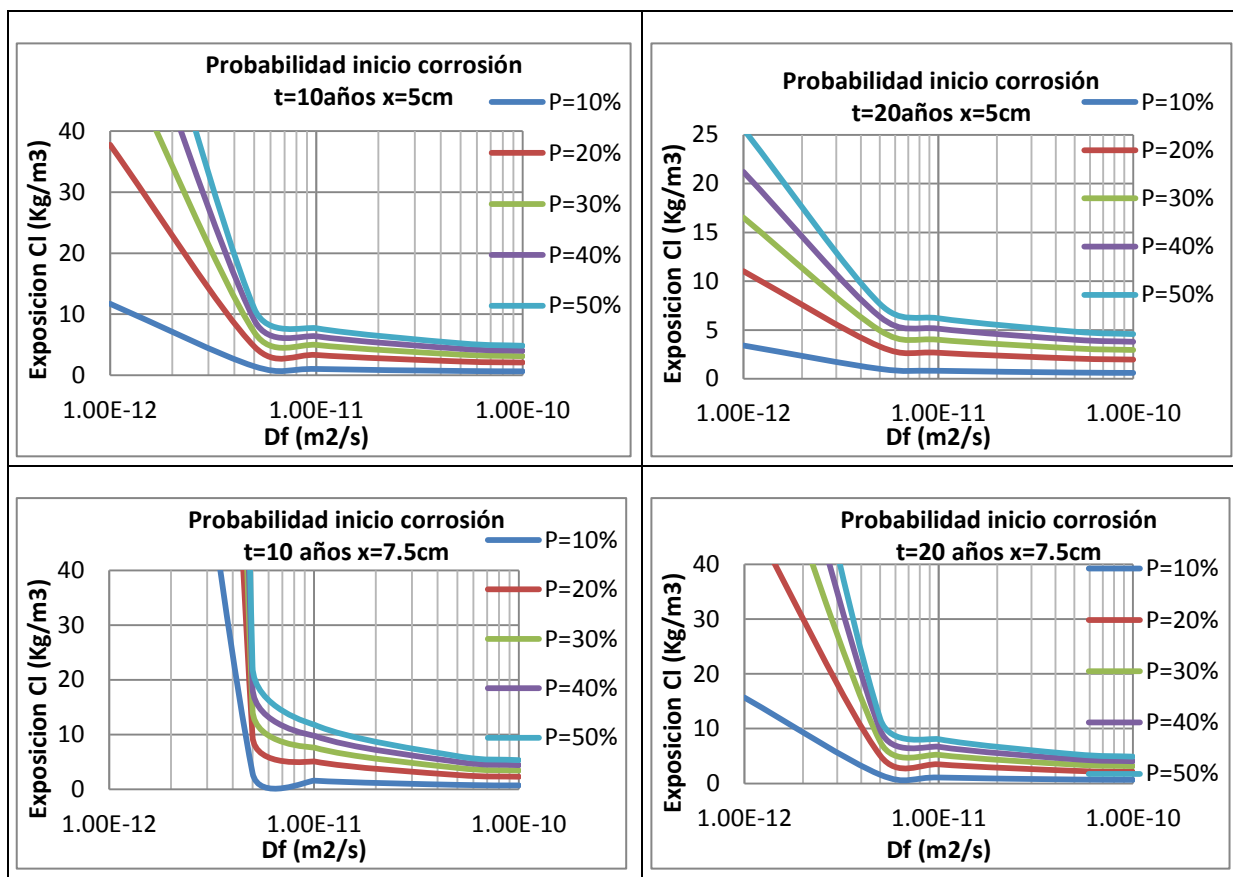


Figura 12. Cálculo gráfico de probabilidad de inicio de corrosión

Como se puede observar en las gráficas de la Figura 12, para un recubrimiento igual a $x=7.5$ cm y 10 cm y un tiempo de la estructura de 10 años, para concretos con el coeficiente de difusión menor a $5\text{E-}12 \text{ m}^2/\text{s}$ la probabilidad de inicio de corrosión es mucho menos que 10%. De esta manera se puede explorar para casos similares la probabilidad de inicio de la corrosión, dados diferentes valores de D_f y C_s para una estructura de concreto reforzado. Igualmente se puede estimar el tiempo en que se alcanzará el umbral de cloruros para una determinada probabilidad conociendo el D_f y la concentración de cloruros en el medio (C_s).

Igualmente se puede estimar el tiempo en que se alcanzará el umbral de cloruros para una determinada probabilidad conociendo el D_f y la exposición.

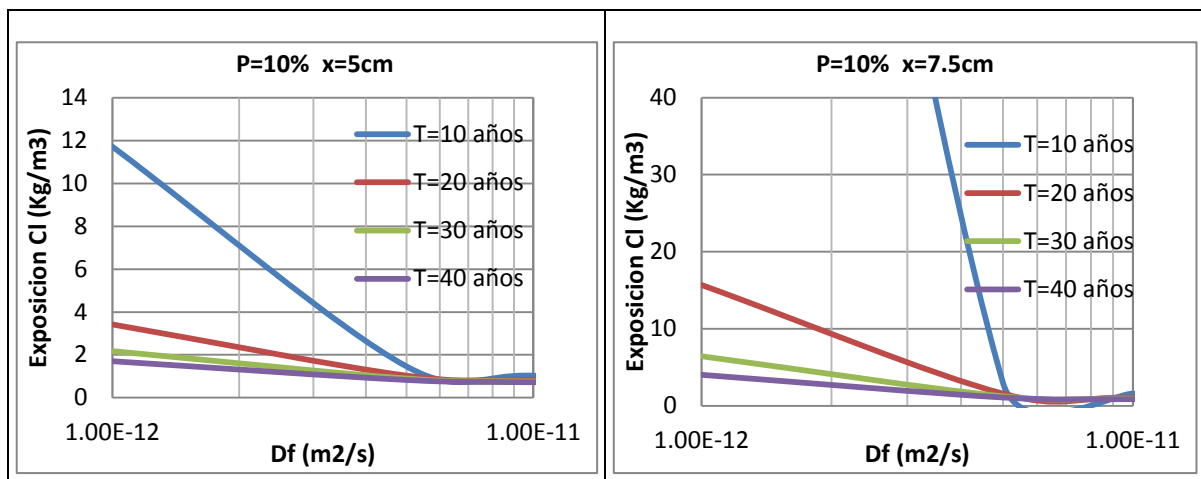
Para hacer un análisis generalizado a otros tipos de concreto, se puede usar la correlación establecida en la ecuación 7 para determinar el coeficiente de difusión de acuerdo con la relación agua- cemento. Los valores obtenidos se presentan en la Tabla 7:

Tabla 7. Relación w/c-Df

| W/C | Df (mm ² /año) | Df (m ² /s) |
|------|---------------------------|------------------------|
| 0.40 | 336.90 | 1.06829E-11 |
| 0.45 | 448.42 | 1.42193E-11 |
| 0.50 | 571.14 | 1.81109E-11 |
| 0.55 | 703.29 | 2.23011E-11 |
| 0.60 | 843.28 | 2.67401E-11 |
| 0.65 | 989.75 | 3.13849E-11 |

Es decir que para el caso de un concreto hecho con cemento portland ordinario, sin aditivos, con una w/c de 0.4 el coeficiente de difusión promedio Df de 1.06 E-11 m²/s es calculado. Empleando éste coeficiente de difusión se podrá conocer para un recubrimiento típico (por ejemplo: 5 cm), cuál será la probabilidad de inicio de corrosión a un determinado tiempo de la estructura.

En las gráficas de la Figura 13 se aprecia que para coeficientes de difusión mayores a 5e-12 m²/s se dará inicio a la corrosión en los primeros 20 años de vida de la estructura, debido a que las gráficas se encuentran por debajo de 5kg/m³, es decir, para exposiciones mayores de 5 Kg/m³ el umbral de cloruros será alcanzado durante los primeros 20 años de estructura. Por este motivo para asegurar una estructura con vida útil mayor a 20 años el Df debe ser menor a 5e-12 m²/s



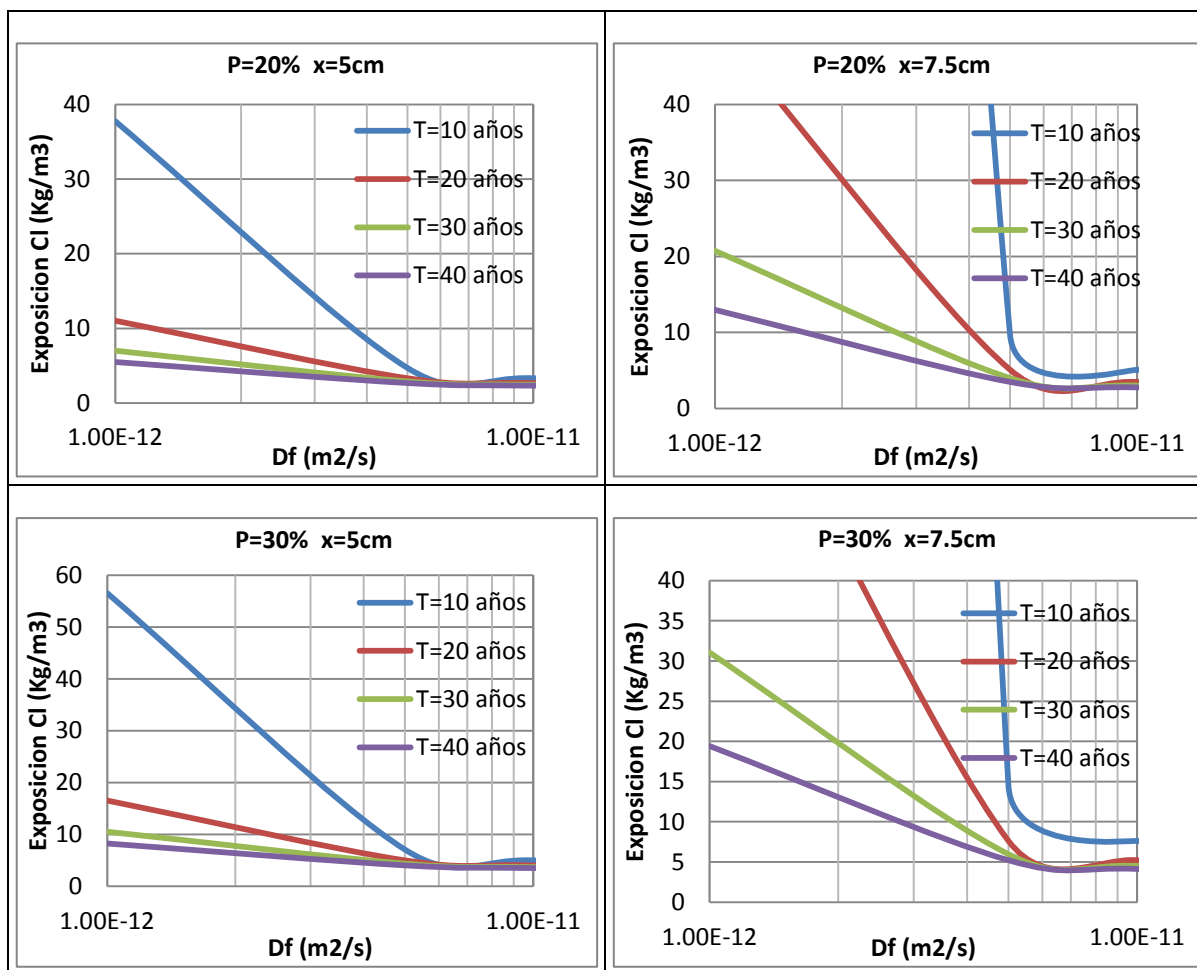


Figura 13. Cálculo grafico de tiempo de inicio de corrosión

Se puede apreciar que para los casos mostrados, la diferencia entre las curvas de 20, 30 y 40 años en las gráficas de 5cm de recubrimiento y probabilidad de 10-30%, es despreciable debido a la cercanía de las curvas. Esto le da importancia a los 10 primeros años de vida útil de la estructura, y para cuestión de diseño se puede ingresar las gráficas empleando la variable tiempo o la probabilidad de inicio de la corrosión en la estructura, para tomar una decisión de que recubrimiento o tipo de concreto emplear.

Las curvas de diseño que se presentan aquí, se pueden usar como ayuda en el diseño si se establece una probabilidad máxima para que una estructura presente lo primeros indicios de corrosión, o de igual manera se puede usar el umbral de cloruros máximo establecido por las normativas (1%, NSR-10) para seleccionar recubrimiento adecuado. Las curvas de las Figura 12 y 13 pueden ser usadas también para planificar el mantenimiento preventivo de estructuras de concreto reforzado.

6.2 ANALISIS BIDIMENCIONAL, EFECTO DE BORDE

El fenómeno de difusión de cloruros en el concreto se ha estudiado generalmente como el transporte en una dimensión. Sin embargo, el transporte en dos dimensiones se considera pertinente de estudio pues tiene en cuenta el efecto de borde, que corresponde principalmente al caso del ingreso de cloruros por dos caras de la estructura. Esto sucede por ejemplo, en el caso de subestructuras de puentes que están sumergidas u otras estructuras que por su geometría, el análisis en una dimensión no sería pertinente. En este caso, el contenido de cloruros en el concreto es mayor y disminuye el tiempo para el inicio de la corrosión en el acero de refuerzo pues se alcanzaría el umbral de cloruros más rápidamente. El aumento es debido a que hay un aporte de cloruros en una mayor área expuesta por dos direcciones. Se considerará el efecto de borde o análisis bidimensional para la geometría planteada, dado que existen estructuras de concreto reforzado que trabajan con un sistema de pórticos (Vigas y Columnas), en cual no posee elementos lo suficientemente extensos como para poderlo modelar como una dimensión. La consideración bidimensional para la ecuación de difusión se puede expresar como (Solano et al., 2013):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = Dfx \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + Dfy \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (15)$$

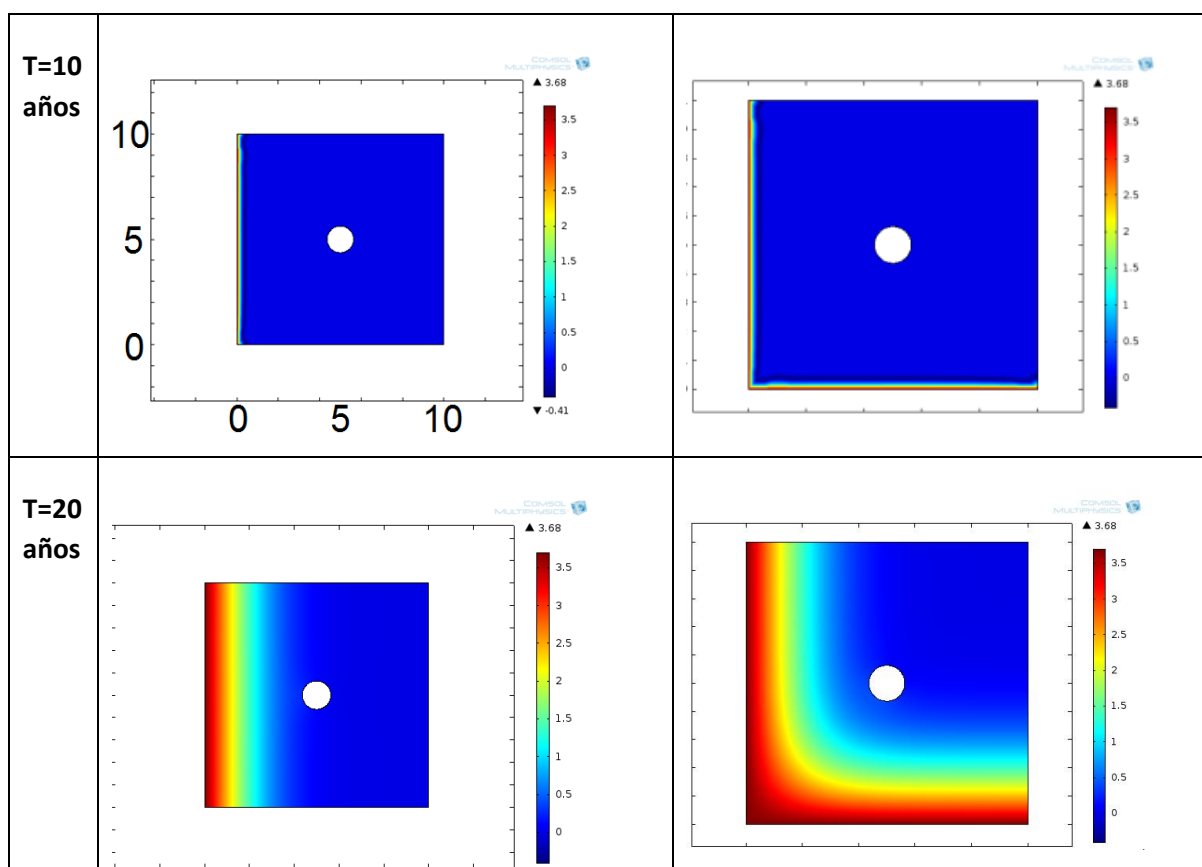
La solución numérica, análogamente a la sección 4.5.1., puede expresarse como un aporte de cada dimensión (x,y) (Yang et al., 2013):

$$C(x,t) = C_{s,0} \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dfx * t}} \right) \operatorname{erf} \left(\frac{y}{2\sqrt{Dfy * t}} \right) \right) \quad (16)$$

El efecto de borde enmarcado en el análisis bidimensional del transporte de cloruros en el concreto es un fenómeno complejo que hasta el momento no se ha estudiado a profundidad, sin embargo es más crítico que el ingreso de cloruros en 2D. Esta diferencia es significativa cuando se estudia el comportamiento de la estructura en términos de durabilidad. Villagran (2011) realizó un modelo de penetración de cloruros en dos dimensiones analizando que el ingreso en 2D es más crítico que en 1D. Por otro lado Yang et al. (2012) realizó un modelo con una geometría similar al **M3** (modelo con grieta) del cual se concluyó que en la zonas cercanas a la grieta se da un ingreso de cloruros mayor debido al aporte de los cloruros por dos dimensiones al generarse dos superficies de ingreso.

También se ha utilizado el modelo bidimensional para representar secciones de puentes (Biondini et al., 2004), sin embargo, el análisis realizado en las secciones consideradas en éste estudio no contemplaba diferencias al evaluar el efecto de borde o el efecto unidimensional, sin embargo al igual que Villagran (2011) se evidencia que en las esquinas de las secciones los cloruros ingresan más rápidamente.

La penetración bidimensional representaría mucho mejor la situación para vigas y columnas, en la Figura 14 se muestra el proceso de transporte de cloruros 1D vs 2D, para los primeros 40 años usando los parámetros de la validación del modelo, es decir, una exposición de 3.68 %wc y un coeficiente de difusión de $1.46 \text{ cm}^2/\text{año}$, las zonas en rojo indican un mayor contenido de cloruros y en azul, el contenido inicial de cloruros.



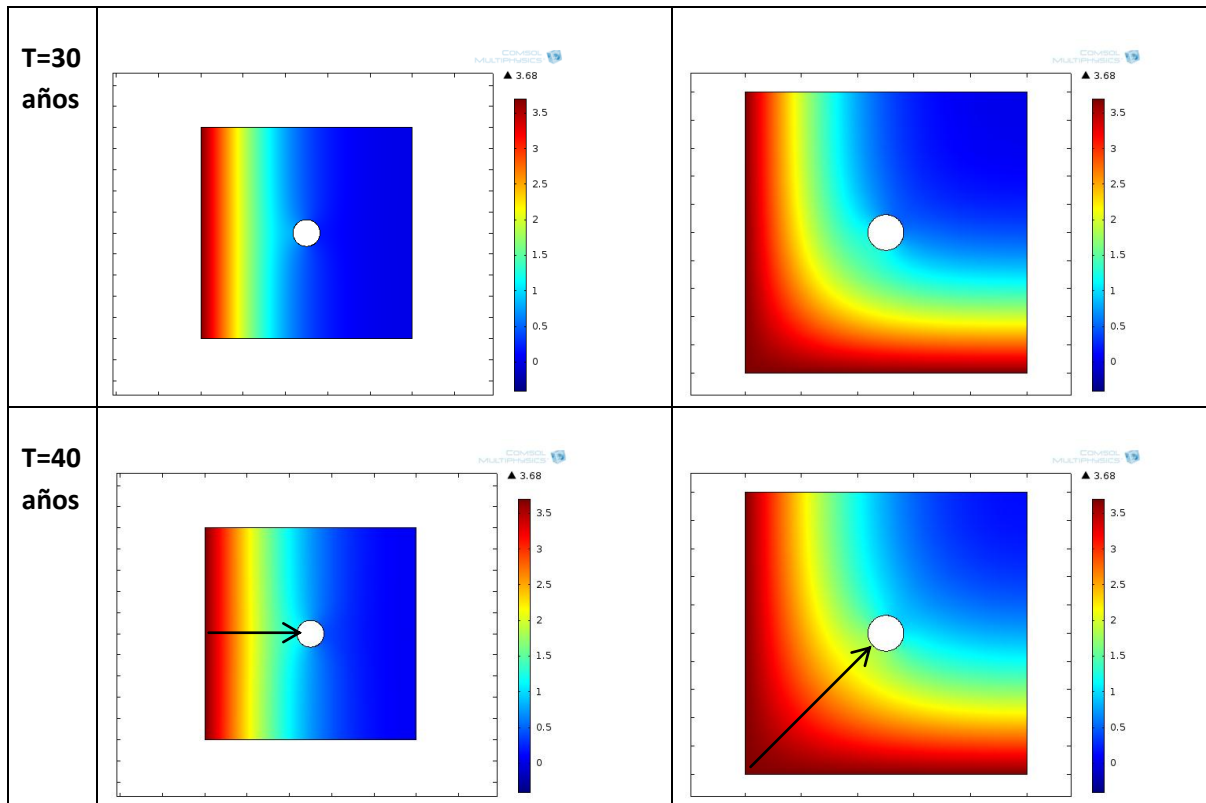


Figura 14. Comparación transporte de cloruros 1D vs 2D- ruta crítica

Como se aprecia en la Figura 14, al considerar el efecto bidimensional (modelo 2-D) el contenido de cloruros alcanza el umbral crítico establecido (1% wc) a un menor tiempo que el estimado en una dimensión (modelo 1D). Este aspecto es crítico en el caso de usar modelos de 1D en la predicción de la penetración del ión cloruros en elementos estructurales de concreto reforzado que representan vigas o columnas, dado que el tiempo de inicio de corrosión sería mayor por no considerar el efecto de borde subestimando el fenómeno real. Esto es de principal importancia en la durabilidad de estructuras de sección cuadrada o rectangular usualmente empleadas en elementos estructurales en contacto directo con ambientes costeros-marinos.

En los modelos 1D y 2D la zona de mayor concentración del ión cloruro asociada a la zona de la estructura donde comenzará la corrosión más rápidamente, será la señalada en la Figura 14. Por esta razón, se extraen los perfiles de cloruros obtenidos en el modelo y arrojados por Comsol Multiphysics®, específicamente en la trayectoria indicada que corresponde a la mayor concentración de cloruros.

Como se muestra en la Figura 14 el recorrido de los cloruros para el caso 2D es más largo, lo cual corresponde a una distancia de $5\sqrt{2} - \frac{b}{2}$ cm (diagonal), mientras que en 1D la

misma distancia sería $5 - \frac{b}{2}$ cm (horizontal); en ambos casos b es el diámetro de la barra de refuerzo de la sección crítica. Los perfiles de cloruros mostrados a continuación se construyeron con los datos obtenidos del modelo durante los primeros 40 años de penetración de cloruros en 1D y 2D. Para el caso de 2D, los datos del perfil se extrajeron de los datos seleccionados de los resultados del modelo por lo tanto, no representan una ecuación específica.

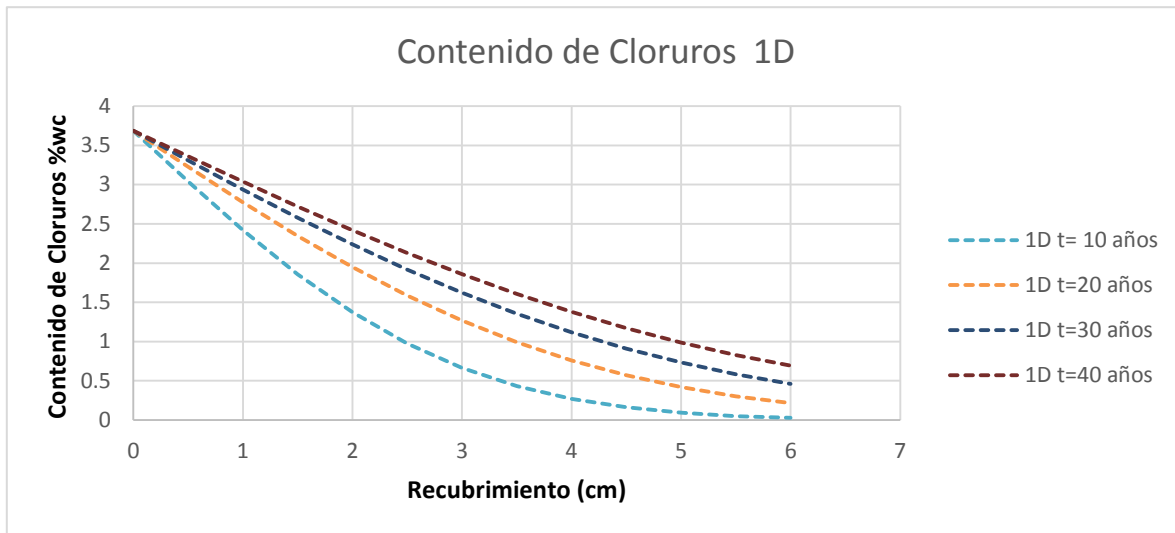


Figura 15. Perfil de cloruros para diferentes tiempos 1D

En la Figura 15 se muestra los perfiles de cloruros proyectados a diferentes tiempos de la estructura: 10, 20, 30 y 40 años. El cual podría representar un ingreso de unidimensional, sin embargo si extraemos el perfil de cloruros que se obtendría de un ingreso bidimensional se obtendrían perfiles como los mostrados en la Figura 16 según el recorrido crítico mostrado en la Figura 14.

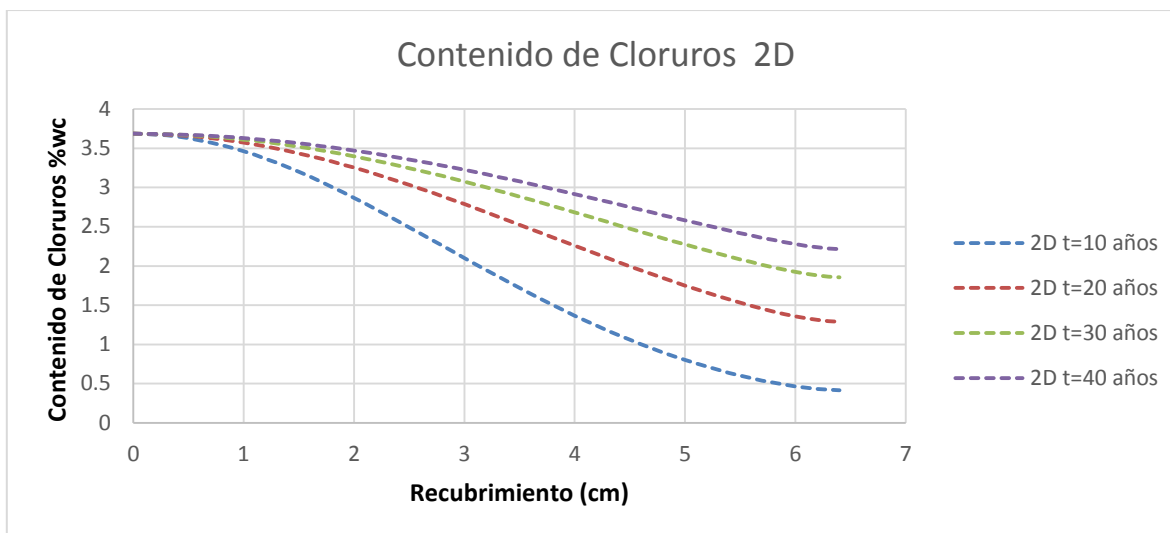


Figura 16. Perfil de cloruros para diferentes tiempos 2D

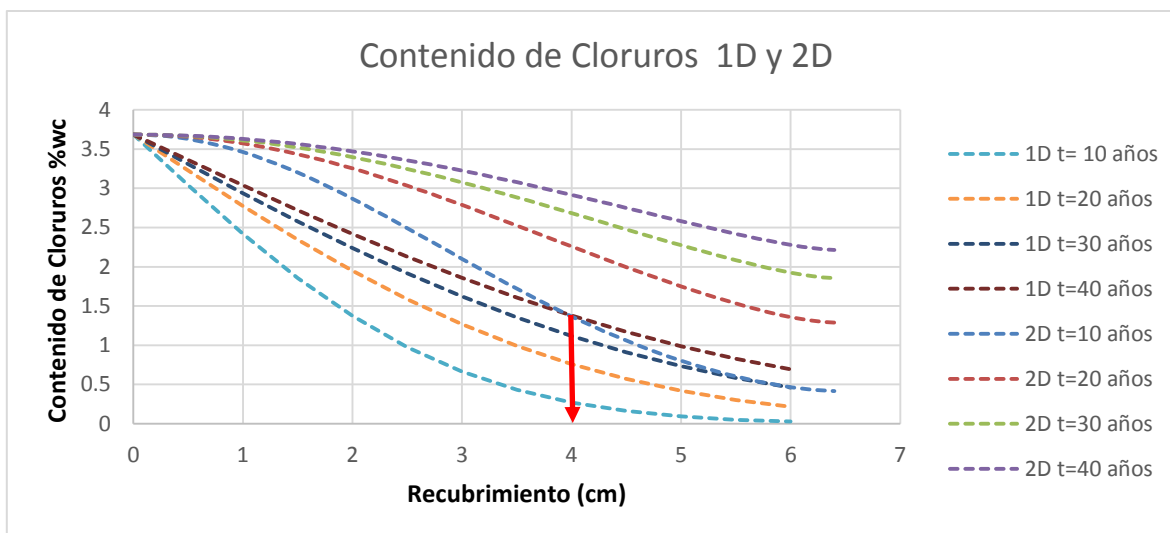


Figura 17. Superposición perfiles de cloruros 1D y 2D según el trayecto crítico

Como se aprecia en la Figura 17 los perfiles de cloruros del modelo de 2D, a pesar de tener una mayor trayectoria de ingreso de cloruros presentan mayor nivel de cloruros que los modelos de 1D. Para el modelo 2D, alcanzará el umbral de cloruros en un menor tiempo. Por ejemplo si una columna tuviera un recubrimiento de 4 cm, el perfil de cloruros 1D con t=40 años tiene la misma acumulación de cloruros que el de 10 años en 2D, es decir, que el umbral de cloruros podría alcanzarse en menos tiempo, para este caso en 4 veces menos el tiempo de los resultados del modelo 2D.

Por ello, según la Figura 18 se calcula la razón de contenidos de cloruros del modelo 2D vs 1D, en el cual se muestra que para todos los casos es mayor que 1. Para recubrimientos menores de 2 cm la diferencia de los modelos puede llegar a ser del doble, pero para mayores distancias el error se vuelve mayor. Un caso particular de una estructura con recubrimiento de 5 cm a 10 años, puede presentar un contenido de cloruros 8.7 veces mayor en un modelo 2D que en uno 1D.

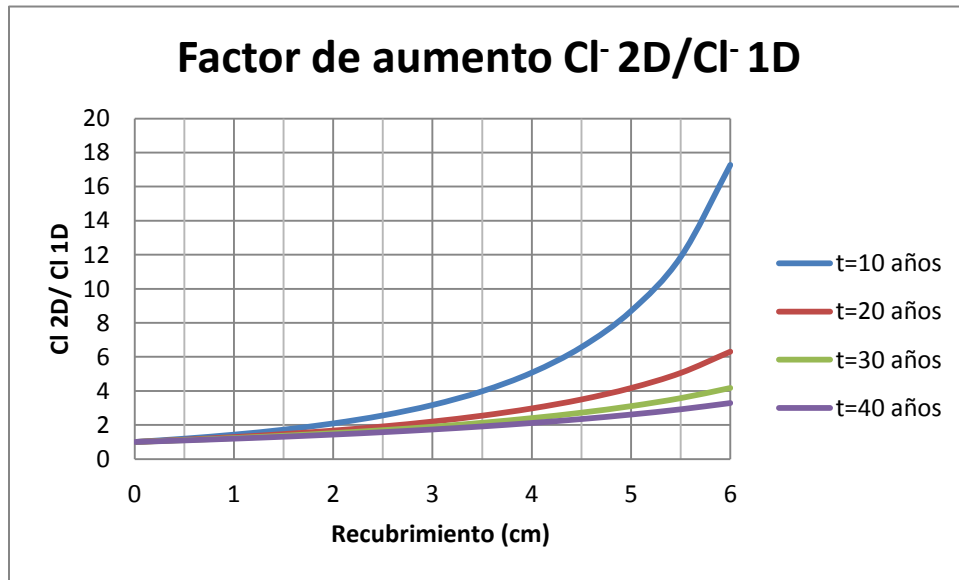


Figura 18. Gráfica de factor de aumento 2D/1D en diferentes tiempos

A largo plazo, el contenido de cloruros se estabiliza según el modelo, debido a que llega a su punto máximo que es la misma concentración límite, por ello las curvas de la Figura 18 tienden hacia uno (1), es decir, iguales contenidos en los dos modelos. Sin embargo, en términos de durabilidad considerar el efecto de borde puede ser vital para la predicción de inicio de corrosión de una estructura. Esta diferencia muestra la importancia de seleccionar un modelo adecuado al elemento estructural que se analice. Los modelos 2D deben asignarse a vigas y columnas que consideran el efecto de borde, y para losas y muros de concreto se debe asignar un modelo 1D.

7. VALIDACIÓN DEL MODELO 1D

Aunque, está basado en principios sólidos, el modelo 1-D que se utilizó para estimar el perfil de cloruros en el concreto, presenta una configuración genérica de aplicación involucrando numerosas simplificaciones y suposiciones en aras de la aplicación práctica. Por lo tanto, la validación de las proyecciones del modelo en términos de perfiles de cloruros comparándolo con un sistema real bien caracterizado es altamente deseable. En esta sección, se aplicó el modelo para calcular perfiles de cloruros en cilindros de concreto sometidos al ensayo de inmersión a distintas edades.

El modelo fue adaptado con cambios mínimos para simular el sistema físico real. Los cálculos del modelo se llevaron a cabo para simular el perfil de cloruros obtenido experimentalmente a distancias de 0.3, 1, 2, 3 y 4 cm. Detalles de los parámetros geométricos se muestran en las Figura 19 y 20. Se usaron cilindros de concreto elaborados con una mezcla tipo cuya composición se muestra en la Tabla 8, correspondiente a un concreto de resistencia de 3,000 psi:

Tabla 8. Tabla de diseño de mezcla para el concreto 3000 psi

| | | | |
|---------------------------|------------|---------------------------|------|
| Mezcla | OPC | Agg. fino | 711 |
| Slump | 80 | [Kg/m³] | |
| [mm] | | Agg. Grueso | 1043 |
| w/b | | [Kg/m³] | |
| OPC | 350 | Agua | 200 |
| [Kg/m³] | | [Kg/m³] | |

7.1 TOMA DE DATOS

Usando una configuración de una sola cara expuesta (cara superior), se dejaron en inmersión 4 probetas en una solución con una concentración de 1M de NaCl durante 12, 55,76 y 81 días, con la nomenclatura respectiva C1, C2, C3 y C4. Luego del tiempo de inmersión, se procedió a la extracción de muestras de polvo de concreto para análisis de cloruros siguiendo el procedimiento establecido en la norma ASTM 1152, a distancias promedios de 0.3-1.0-2.0-3.0-4.0 cm de la cara expuesta según configuración mostrada en la Figura 20. Para recolectar la cantidad de muestra se hicieron varias perforaciones a lo largo de la superficie del cilindro y se reservaron para análisis posterior.



Figura 19. Cilindros pintados para ensayo de inmersión a cloruros

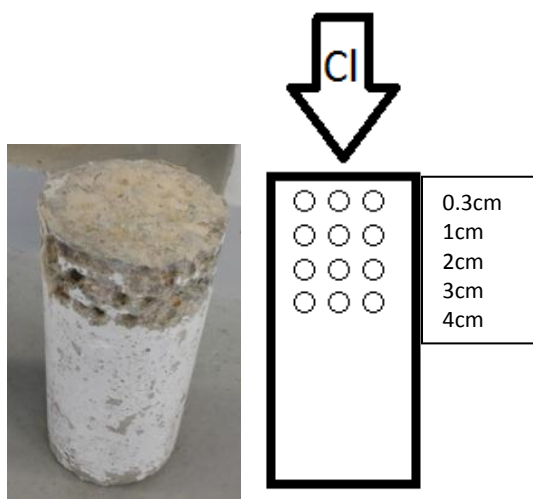


Figura 20. Toma de polvo en cilindro



Figura 21. Polvo de concreto almacenado

El Proceso de medición del contenido de cloruros totales se realizó basándose en la Norma ASTM C1152, el procedimiento realizado fue el siguiente:

- Se toman 20 gramos de polvo de concreto extraído de los cilindros de concreto, luego de cumplir el tiempo de inmersión especificado. Esta muestra fue extraída con un taladro (Figura 21).

- Se diluye una muestra de 3 gramos en 75 ml de agua destilada (Figura 22).

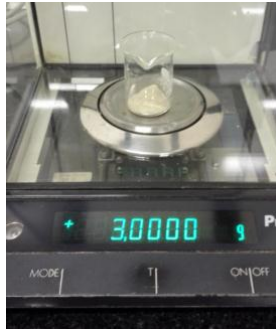


Figura 22. Toma de muestra para ensayo

- Luego se agregan lentamente 25 ml de ácido nítrico a la solución. (Figura 23).



Figura 23. Disolución de muestra en agua destilada y ácido Nítrico

- Se agregan 3 gotas de indicador metil-naranja el cual debe colorear la solución de un tono rosado, lo cual indica que el PH es el adecuado para iniciar las mediciones (Figura 24).



Figura 24. Muestra de polvo de Cemento

- Se debe mezclar durante 10 minutos con el fin que la reacción se lleve a su totalidad.
- Se toma la medición de voltaje con el equipo que utiliza un electrodo de ión selectivo de cloruros.

Conversión de los datos:

- Previamente a la medición inicial se debe realizar una curva de calibración del ión selectivo con soluciones buffer.
- El dato medido de la muestra se debe interpolar en la curva de calibración para obtener la concentración de cloruros en los 100 ml de solución.
- Luego se debe realizar la conversión de unidades de concentración de cloruros a %wc para todas las mediciones usando la siguiente expresión: .

$$\%wc = \frac{|Cl^-|_{mol}}{litro} * Vol. solución litro * 35.45 \frac{gr}{mol} * \frac{1}{3gr muestra} * \frac{2400 \frac{Kg}{m^3}}{350 \frac{Kg}{m^3}} \quad (17)$$

Tabla 9. Valores medidos de cloruros de 4 cilindros

| | Dato Ion Selectivo | | | | |
|-------------------------|--------------------|----------|----------|---------|------------|
| | Distancia(cm) | mgCl/gwc | %wc | Kg/m3 | Lb/yd3 |
| Cilindro 1 T=12 días | 0.3 | 33.8394 | 3.38394% | 11.8438 | 19.9633394 |
| | 1.0 | 11.0535 | 1.10535% | 3.8687 | 6.52096069 |
| | 2.0 | 7.1733 | 0.71733% | 2.5107 | 4.23185997 |
| | 3.0 | 7.8338 | 0.78338% | 2.7418 | 4.62149413 |
| | 4.0 | 3.4752 | 0.34752% | 1.2163 | 2.05015089 |
| | | | | | |
| Cilindro 2 T=55 días | 0.3 | 37.8021 | 3.78021% | 13.2307 | 22.3011444 |
| | 1.0 | 13.1175 | 1.31175% | 4.5911 | 7.73856746 |
| | 2.0 | 9.7326 | 0.97326% | 3.4064 | 5.74169236 |
| | 3.0 | 5.7698 | 0.57698% | 2.0194 | 3.40388737 |
| | 4.0 | 4.0368 | 0.40368% | 1.4129 | 2.38148841 |
| | | | | | |
| Cilindro 3 T=76 días | 0.3 | 48.5616 | 4.85616% | 16.9966 | 28.6486626 |
| | 1.0 | 25.4602 | 2.54602% | 8.9111 | 15.0200845 |
| | 2.0 | 6.6306 | 0.66306% | 2.3207 | 3.91167449 |
| | 3.0 | 6.9195 | 0.69195% | 2.4218 | 4.08213943 |
| | 4.0 | 3.8236 | 0.38236% | 1.3383 | 2.25572928 |
| | | | | | |
| Cilindro 4 T=81 días | 0.3 | 24.0866 | 2.40866% | 8.4303 | 14.2097366 |
| | 1.0 | 10.1008 | 1.01008% | 3.5353 | 5.95892181 |
| | 2.0 | 7.0571 | 0.70571% | 2.4700 | 4.16331322 |
| | 3.0 | 7.6763 | 0.76763% | 2.6867 | 4.52859525 |
| | 4.0 | 7.6488 | 0.76488% | 2.6771 | 4.51236049 |
| | | | | | |

Los datos mostrados en la Tabla 9 son los resultados de las mediciones iniciales según el procedimiento mencionado, debido a que el muestreo se realizó con 20 gramos y la medición sólo emplea 3 gramos, se tomaron replicas para cada muestra. Las réplicas son mostradas en la Tabla 10.

Tabla 10. Valores de las réplicas de cloruros de los cilindros

| | Dato óSelectivo | | | | |
|-------------------|--------------------|---------|----------|---------|------------|
| | Distancia(cm) | mg/g | %wc | Kg/m3 | Lb/yd3 |
| Cilindro 1 | 0.3 | 64.2956 | 6.42956% | 22.5035 | 37.9308292 |
| | 1.0 | 41.3190 | 4.13190% | 14.4617 | 24.3759192 |
| | 2.0 | 6.5755 | 0.65755% | 2.3014 | 3.87920497 |
| | 3.0 | 6.2316 | 0.62316% | 2.1810 | 3.67627051 |
| | 4.0 | 5.5849 | 0.55849% | 1.9547 | 3.29475372 |
| | | | | | |
| Cilindro 2 | Dato lón Selectivo | | | | |
| | Distancia(cm) | mg/g | %wc | Kg/m3 | Lb/yd3 |
| | 0.3 | 44.9403 | 4.49403% | 15.7291 | 26.5122909 |
| | 1.0 | 27.4581 | 2.74581% | 9.6103 | 16.1987723 |
| | 2.0 | 13.8470 | 1.38470% | 4.8465 | 8.16896149 |
| | 3.0 | 12.7232 | 1.27232% | 4.4531 | 7.50594959 |
| | 4.0 | 6.9608 | 0.69608% | 2.4363 | 4.10649157 |
| Cilindro 3 | Dato lón Selectivo | | | | |
| | Distancia(cm) | mg/g | %wc | Kg/m3 | Lb/yd3 |
| | 0.3 | 34.5759 | 3.45759% | 12.1016 | 20.3978477 |
| | 1.0 | 30.4801 | 3.04801% | 10.6680 | 17.9815377 |
| | 2.0 | 8.8271 | 0.88271% | 3.0895 | 5.20750832 |
| | 3.0 | 2.1477 | 0.21477% | 0.7517 | 1.26703258 |
| | 4.0 | 0.6225 | 0.06225% | 0.2179 | 0.36723242 |
| Cilindro 4 | Dato Ion Selectivo | | | | |
| | Distancia(cm) | mg/g | %wc | Kg/m3 | Lb/yd3 |
| | 0.3 | 29.9556 | 2.99556% | 10.4845 | 17.6721321 |
| | 1.0 | 15.5952 | 1.55952% | 5.4583 | 9.20031335 |
| | 2.0 | 6.2040 | 0.62040% | 2.1714 | 3.66003575 |
| | 3.0 | 3.2732 | 0.32732% | 1.1456 | 1.93103414 |
| | 4.0 | 3.2911 | 0.32911% | 1.1519 | 1.94158673 |

Las mediciones varían debido a que la muestra fue tomada y almacenada por partes, y al momento de tomar la medición se seleccionaron 3 gramos aleatorios los cuales podían incluir parte de agregado triturado por la broca en el momento de extracción. En este caso la cantidad de agregado incluida en la muestra induce una variabilidad en las mediciones del contenido de cloruros. Los perfiles de cloruros promedio de las mediciones realizadas se muestran en las Figura 25, 26, 27, y 28.

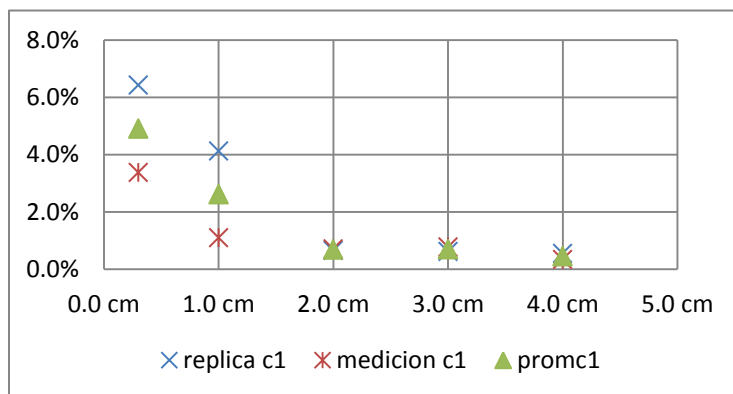


Figura 25. Perfil de cloruros C1

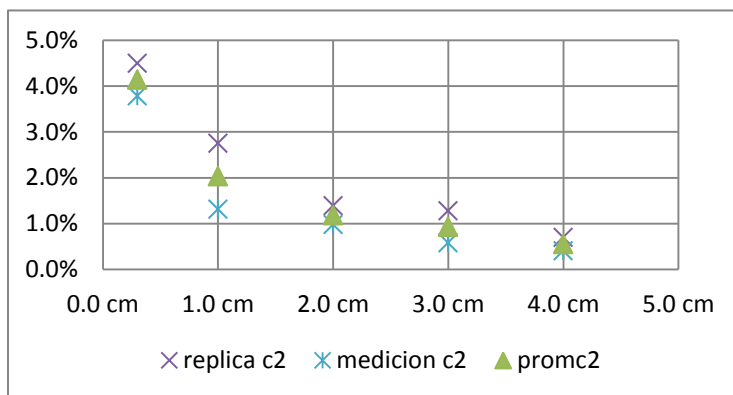


Figura 26. Perfil de cloruros C2

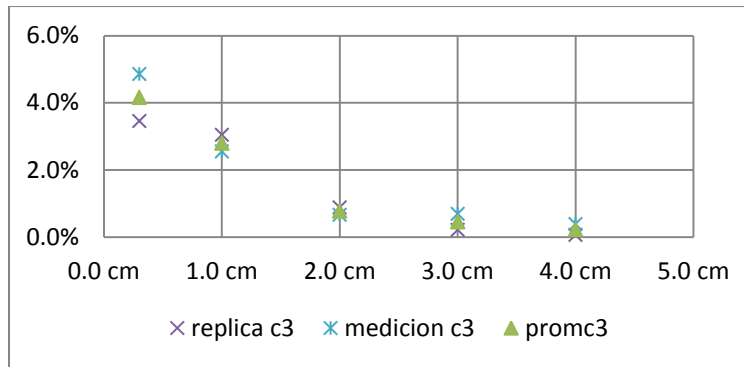


Figura 27. Perfil de cloruros C3

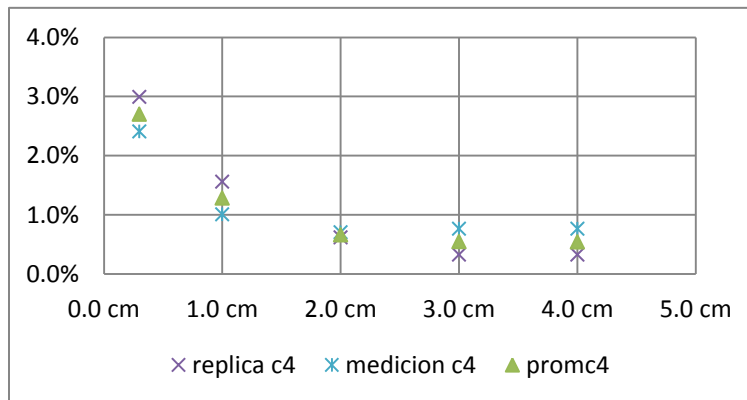


Figura 28. Perfiles de cloruros C4

7.2 SELECCIÓN DE PARÁMETROS

Los parámetros se obtuvieron a partir de la regresión del perfil de cloruros, obtenido de las mediciones realizadas en laboratorio en cilindros de concreto que se presenta en la Tabla 11.

Tabla 11. Parámetros de regresión de datos

| | |
|--------------|---------|
| Age [días] | 12 |
| Cs[%wc] | 4.97088 |
| Co[%wc] | 0.61221 |
| Df [cm2/dia] | 0.0167 |

Para la obtención de estos parámetros se ajustaron los datos experimentales a la siguiente ecuación (solución teórica de las leyes de Fick) usando una hoja de cálculo de Excel y así obtener el coeficiente de Difusión, el contenido inicial de cloruros (C_0), y el contenido de cloruros en la superficie (C_s):

$$C(x, t) = C(0, t) - (C(0, t) - C(x, 0)) \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Df * t}}\right) \quad (14)$$

A partir del análisis de los datos obtenidos de las mediciones en el laboratorio, se presenta a continuación el error encontrado comparándolo con los resultados del modelo. Este error se calcula a partir de la diferencia entre los datos del modelo con las mediciones obtenidas del cilindro No 1 en el laboratorio (Tabla 12. Comparación de datos medidos vs Modelo vs Teoría C1 Tabla 12).

Tabla 12. Comparación de datos medidos vs Modelo vs Teoría C1

| xi[cm] | C(xi)[kg/m3] | CTeórico(xi) | Δ^2 | Modelo | Δ^2 |
|------------------|--------------|--------------|------------|-----------|------------|
| 0.3 | 3.3839% | 3.38322% | 5.1779E-11 | 3.396893% | 1.6788E-08 |
| 1.0 | 1.1054% | 1.11071% | 2.8758E-09 | 1.103625% | 2.9837E-10 |
| 2.0 | 0.7173% | 0.61914% | 9.641E-07 | 0.620206% | 9.4335E-07 |
| 3.0 | 0.7834% | 0.61222% | 2.9295E-06 | 0.612276% | 2.9276E-06 |
| 4.0 | 0.3475% | 0.61221% | 7.0064E-06 | 0.612213% | 7.0064E-06 |
| Error cuadrático | | | 1.0903E-05 | | 1.0894E-05 |

Análogamente al error del modelo en Comsol® comparado con datos experimentales, se realizó una comparación con datos de la literatura, los datos de Roa- Rodríguez (2013). Según la regresión realizada se obtuvo de la hoja de cálculo de Excel un coeficiente de Difusión de $2.5 \text{ cm}^2/\text{año}$ que es equivalente a $7.94 \text{ E-12 m}^2/\text{seg}$, el cual se encuentra dentro de los rangos observados en la literatura.

La concentración de cloruros en la superficie (C_s), obtenida a partir de los datos de Roa- Rodríguez (2013) fue de 3.68% KgCl/Kg cemento que es equivalente a 14.74 Kg Cl/m^3 . El perfil de cloruros encontrado por este autor se muestra en la Figura 29.

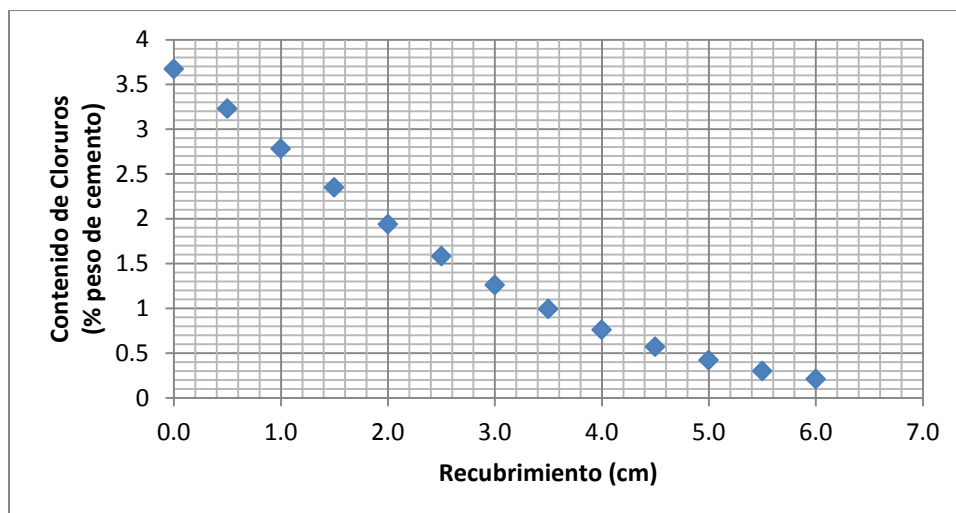


Figura 29. Perfil de Cloruros modelo a 2 años

Como se muestra en la siguiente tabla, el modelo se ajusta a los datos experimentales presentando un error cuadrático de 5.08 E-4 comparado con las mediciones. Este error es considerablemente pequeño teniendo en cuenta que el empleo del software genera una diferencia de 1E-4 comparado con la regresión teórica, generado debido al uso de elementos finitos.

Tabla 13. Calculo de Error del Modelo propuesto y modelo de Roa- Rodríguez (2013)

| xi[cm] | Cmedido(xi) [%wc] | C teórico(xi) | Δ^2 | Cmodelo(xi) Propuesto | Δ^2 | Cmodelo Roa- Rodriguez(xi) | Δ^2 |
|--------------------------------|----------------------|---------------|------------|--------------------------|------------|----------------------------------|------------|
| 0.0 | 3.67 | 3.6848 | 2.20E-04 | 3.6848 | 2.20E-04 | 3.97 | 9.00E-02 |
| 0.5 | 3.23 | 3.2221 | 6.20E-05 | 3.2244 | 3.17E-05 | 3.50 | 7.29E-02 |
| 1.0 | 2.78 | 2.7708 | 8.45E-05 | 2.7749 | 2.64E-05 | 3.01 | 5.29E-02 |
| 1.5 | 2.35 | 2.3414 | 7.33E-05 | 2.3466 | 1.19E-05 | 2.54 | 3.61E-02 |
| 2.0 | 1.94 | 1.9430 | 9.00E-06 | 1.9483 | 6.91E-05 | 2.10 | 2.56E-02 |
| 2.5 | 1.58 | 1.5824 | 5.60E-06 | 1.5871 | 4.99E-05 | 1.71 | 1.69E-02 |
| 3.0 | 1.26 | 1.2640 | 1.59E-05 | 1.2675 | 5.62E-05 | 1.37 | 1.21E-02 |
| 3.5 | 0.99 | 0.9898 | 2.97E-08 | 0.9919 | 3.57E-06 | 1.07 | 6.40E-03 |
| 4.0 | 0.76 | 0.7596 | 1.95E-07 | 0.7603 | 7.23E-08 | 0.82 | 3.60E-03 |
| 4.5 | 0.57 | 0.5709 | 8.36E-07 | 0.5707 | 4.36E-07 | 0.62 | 2.50E-03 |
| 5.0 | 0.42 | 0.4202 | 3.04E-08 | 0.4196 | 1.25E-07 | 0.45 | 9.00E-04 |
| 5.5 | 0.3 | 0.3027 | 7.22E-06 | 0.3028 | 8.03E-06 | 0.33 | 9.00E-04 |
| 6.0 | 0.21 | 0.2134 | 1.14E-05 | 0.2155 | 3.03E-05 | 0.23 | 4.00E-04 |
| Error mínimo Cuadrático | | | 4.90E-04 | | 5.08E-04 | | 3.21E-01 |

7.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir del análisis de laboratorio de las muestras de concreto, obtenidas a diferentes tiempos de exposición en la solución de cloruros, se calculó por regresión el coeficiente de difusión aparente (D_f), el contenido de cloruros iniciales (C_0) y la exposición superficial (C_s). El set de valores que representan la mejor solución a la ecuación teórica se muestra en las Figura 31, 32 y 33 para los diferentes tiempos de exposición. Los valores encontrados de la concentración inicial y la exposición son valores aproximadamente constantes dado el poco tiempo de exposición de las probetas, mientras que el coeficiente de difusión disminuyó con las muestras; esto se debe principalmente a que con el tiempo los poros interconectados de la matriz de concreto disminuyen debido al curado a largo plazo. Lo anterior influye directamente en la velocidad de transporte de cloruros. Como era de esperarse se obtuvieron valores bajos de C_0 , lo cual es congruente con la presencia mínima de cloruros en la mezcla de concreto original y un valor relativamente constante de la concentración en la superficie C_s dadas las condiciones de exposición a la misma solución a lo largo de la duración del ensayo.

Relacionando el contenido de cloruros de los cilindros con los datos de Roa-Rodríguez (2013), se observó similitud en el contenido de cloruros, la exposición de los cilindros fue mayor a la usada por Roa-Rodríguez, sin embargo la inclinación del perfil de cloruros de Roa es menor, debido a que tuvo mayor tiempo de exposición tal como se observa en la Figura 30.

A partir de las curvas de predicción de inicio de corrosión según la Figura 12, ingresando con un coeficiente de difusión de $2.6 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ y una exposición de 12 Kg/m^3 , que corresponde a la primera medición del cilindro 4, se obtiene que en menos de 10 años comenzará la corrosión debido al alto coeficiente de difusión. De igual manera se comparó con el modelo y se obtuvo que para un recubrimiento de 5 cm, el contenido de cloruros alcanzará el 1% wc a los 5.44 años, lo cual indica que es un concreto no recomendado en términos de durabilidad. Si este mismo caso se analizara en 2 dimensiones, el tiempo se reduciría debido a la subestimación del efecto de borde tal como se aprecia en la Figura 18.

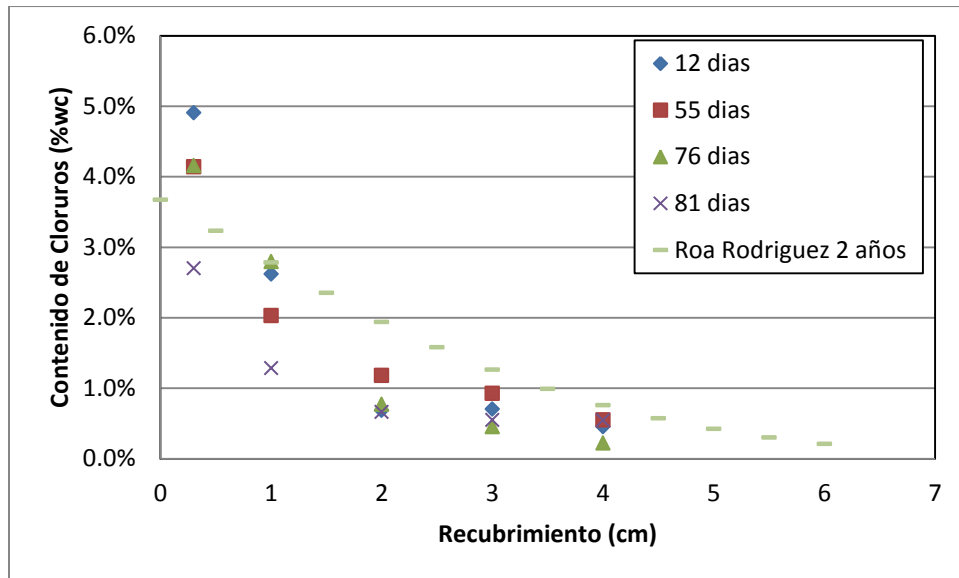


Figura 30. Perfil de cloruros de cilindros vs perfil Roa-Rodríguez

Los resultados del coeficiente de difusión, exposición superficial y concentración inicial de las mediciones se muestran en las siguientes gráficas de las cuales se concluye que la concentración inicial y la exposición son aleatorias, mientras que el coeficiente de difusión disminuyó con las muestras, debido a que con el tiempo los poros interconectados de la matriz de concreto disminuyen debido al curado a largo plazo, lo cual reduce la velocidad de transporte de cloruros.

Como se muestra en la Figura 33 el coeficiente de difusión disminuye con el pasar del tiempo, lo cual es congruente con lo reportado en la literatura de la variación del coeficiente de difusión en el tiempo (Song et al., 2008).

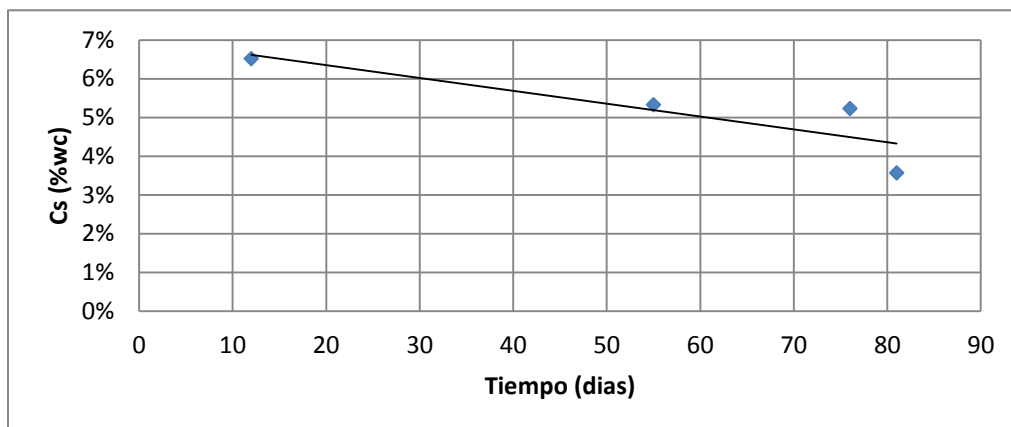


Figura 31. Exposición superficial de las muestras

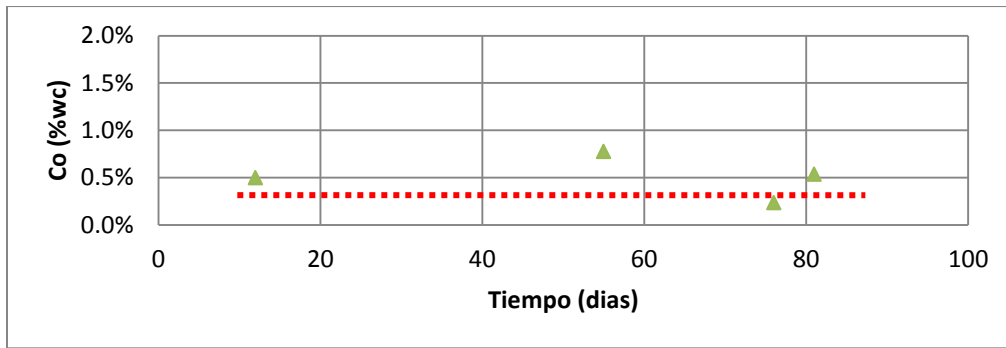


Figura 32. Contenido inicial de cloruros en las muestras

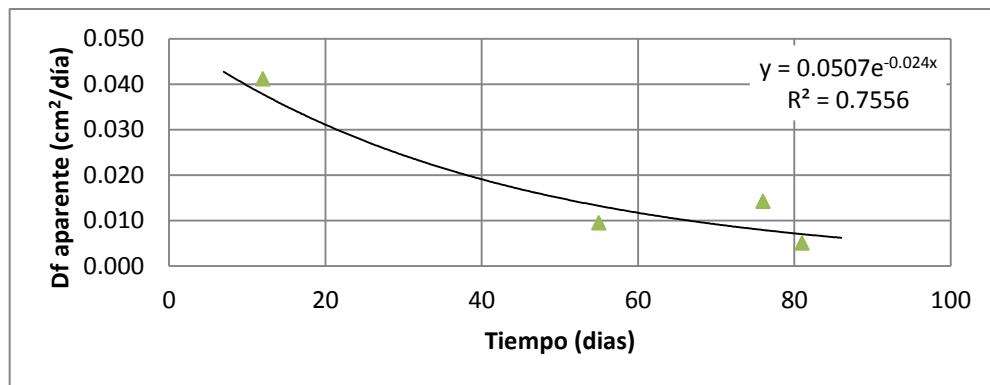


Figura 33. Coeficiente de Difusión en las muestras

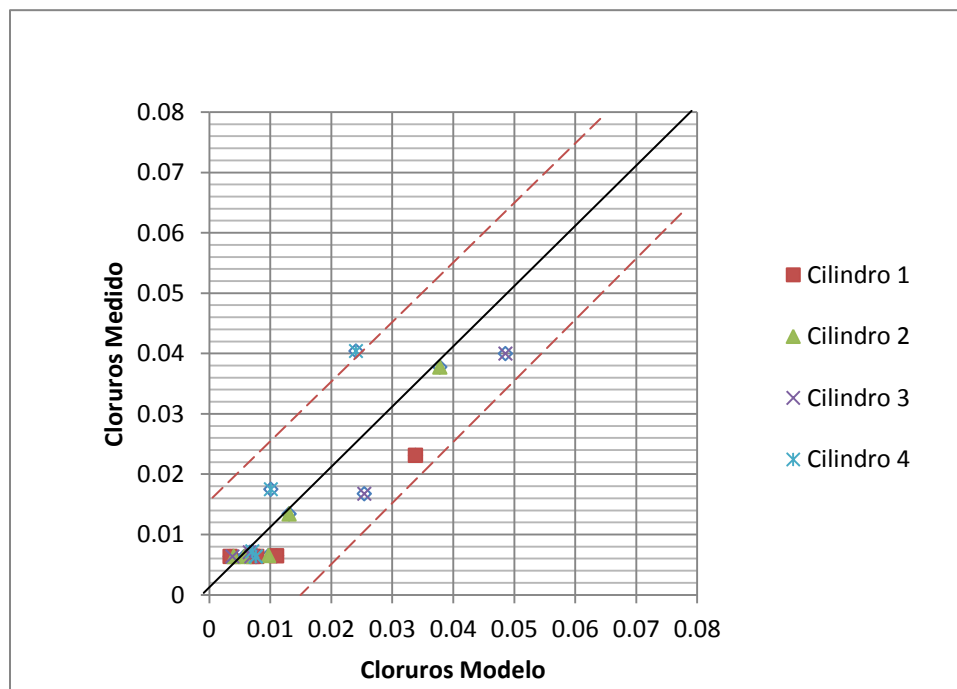


Figura 34. Dispersión de datos medidos contra modelo 1D

Al comparar los datos de cloruros medidos en el laboratorio, y compararlos con los obtenidos del modelo, se obtiene la Figura 34. En ésta se puede apreciar que los datos en gran medida son correspondientes entre sí. Por lo cual se encuentra una relación directa entre el modelo y las mediciones realizadas. El error mostrado en las mediciones de $\pm 1.5\%wc$, comparado con los datos del modelo, se puede atribuir al error en la toma de muestras o mediciones de laboratorio, error por cifras significativas y error en la calibración de los implementos de laboratorio usados en las mediciones.

Los datos medidos experimentalmente inicialmente sirvieron para estimar los parámetros a ingresar al modelo, y en las proyecciones se encontró que los contenidos de cloruros disminuían con respecto al modelo, lo cual se debe a 2 factores principales:

- Dado que los cilindros llevaban poco tiempo desencofrados en comparación con una estructura normal, al sumergirlos en agua salobre continuó su proceso de curado a largo plazo, el cual continúa sellando poros interconectados del concreto disminuyendo la velocidad con la que se transportan los cloruros, es decir, disminuye el coeficiente de difusión.
- Dado que para tener precisión de los datos se usó una broca menor al tamaño máximo de agregado, hubo zonas de medida que contenían probablemente un porcentaje de agregado en vez de matriz cementante del concreto, lo cual en promedio disminuye el contenido de cloruros de la muestra.

8. VALIDACIÓN DEL MODELO 2D

Para la validación del modelo de difusión de cloruros en 2 dimensiones se prepararon en el laboratorio cubos de concreto de dimensiones 10 x 10 x 10 cm . En la fabricación de los especímenes se utilizó el mismo diseño de mezcla de los cilindros empleados en la validación 1D que se muestra en la Tabla 14. Tabla de Diseño de mezcla para el concreto 3000 psi. La preparación de los cubos consistió en pintar con epóxico 4 caras del cubo y dejar expuestas dos caras adyacentes para simular el efecto del ingreso de cloruros en dos dimensiones que pueden representar: pilas de puentes, columnas, entre otros. Para el análisis de los datos obtenidos se trabajó con el concepto de que el ingreso de cloruros por las caras expuestas con respecto a una cara perpendicular a éstas, se puede construir a partir de curvas de nivel con los datos de concentración de cloruros y así predecir cuál ha sido el ingreso de cloruros en un determinado tiempo para compararlo con el modelo.

Tabla 14. Tabla de Diseño de mezcla para el concreto 3000 psi

| | | | |
|---------------------------|------------|---------------------------|------|
| Mezcla | OPC | Agg. fino | 711 |
| Slump | 80 | [Kg/m³] | |
| [mm] | | Agg. grueso | 1043 |
| w/b | 0.57 | [Kg/m³] | |
| OPC | 350 | Water | 200 |
| [Kg/m³] | | [Kg/m³] | |

8.1 TOMA DE DATOS

Luego de dejar los cubos de concreto expuestos a la solución de NaCl con una concentración de 1M, cuidando que dos de las caras sean expuestas a la solución (la cara superior y lateral), se procedió a retirar el cubo después de 14 días de inmersión. Se tomaron muestras de polvo de concreto de acuerdo al esquema de la Figura 35 y las medidas corresponden a la ubicación indicada por las coordenadas (x, y) (Ver Tabla 15. Coordenadas para toma de muestras en cubo en cm).

Las muestras se extrajeron en las coordenadas indicadas debido a que se pretende tener una malla de datos que se puedan graficar como curvas de nivel. Se usó una broca de 3/32" con el fin de obtener suficiente muestra y suficiente precisión en los datos. En la Figura 355 se muestra el croquis para toma de muestras en el cubo, cada línea está separada a un centímetro.

Tabla 15. Coordenadas para toma de muestras en cubo en cm

| X(cm) | Y(cm) | |
|-------|-------|--|
| 1 | 1 | |
| 1 | 3 | |
| 1 | 7 | |
| 2 | 2 | |
| 3 | 1 | |
| 3 | 3 | |
| 3 | 7 | |
| 7 | 1 | |
| 7 | 3 | |



Figura 35. Cubo pintado para medición



Figura 36. Toma de polvo en cubo

El Procedimiento es similar a la toma de datos 1D, la única variante es la extracción de polvo de concreto, que es el siguiente:

- Se tomó el polvo de concreto extraído con un taladro hasta una profundidad de 2 cm, en el plano paralelo al ingreso de cloruros, por lo cual el contenido debe ser el mismo a cualquier profundidad.

Los resultados se muestran en la Tabla 16 de la cual se interpolo los datos sombreados para graficar las curvas de nivel.

Tabla 16. Valores medidos de cloruros

| x\y | 1 | 2 | 3 | 7 |
|-----|------------|------------|------------|------------|
| 1 | 1.8073% | 0.01776463 | 1.7456% | 1.8011% |
| 2 | 0.01629389 | 1.6812% | 0.01512634 | 0.01244162 |
| 3 | 1.3996% | 0.01212129 | 1.1111% | 0.8375% |
| 7 | 1.0791% | 1.0315% | 0.8034% | 0.4360% |

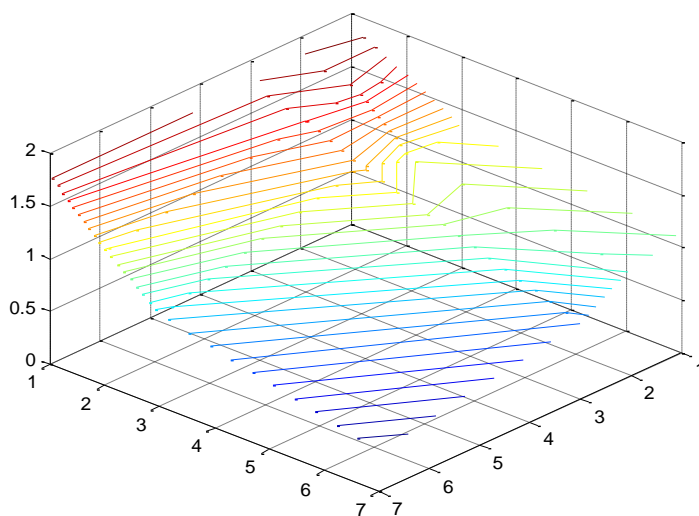


Figura 37. Curvas de contenido de Cl en el Cubo 1

8.2 SELECCIÓN DE PARÁMETROS

Los parámetros se calcularon a partir de la regresión de los datos del perfil de cloruros obtenido de las mediciones realizadas en laboratorio en cilindros de concreto que se presenta en la Tabla 9.

Usando el coeficiente de Difusión, el contenido inicial de Cl (Co), y la exposición (Cs) encontradas en el modelo 1D se emplearon en el modelo para la geometría 2D.

Según las mediciones realizadas se presenta a continuación el error encontrado con el modelo y la ecuación teórica. El error que presentó el modelo frente a las mediciones experimentales del contenido de cloruros para el primer cubo se muestra en la Tabla 17. Se observa una diferencia comparable a la encontrada con el modelo 1D. Este error es bajo y muestra la versatilidad del software Comsol®, que permite modelar geometrías complejas que sería complicado usando una herramienta de cálculo simple como Excel.

Tabla 17. Comparación de datos experimentales cubo 1 vs modelo

| xi[cm] | yi[cm] | C(xi)[%wc] | CModelo(%wc) | Δ^2 |
|------------------|--------|------------|--------------|------------|
| 1 | 1 | 1.883837 | 1.8073 | 5.854E-07 |
| 1 | 3 | 1.280943 | 1.7456 | 2.159E-05 |
| 1 | 7 | 1.273845 | 1.8011 | 2.780E-05 |
| 2 | 2 | 0.596121 | 1.6812 | 1.177E-04 |
| 3 | 1 | 1.260633 | 1.3996 | 1.932E-06 |
| 3 | 3 | 0.612144 | 1.1111 | 2.489E-05 |
| 3 | 7 | 0.613107 | 0.8375 | 5.033E-06 |
| 7 | 1 | 1.269522 | 1.0791 | 3.627E-06 |
| 7 | 3 | 0.612738 | 0.8034 | 3.634E-06 |
| 7 | 7 | 0.612213 | 0.4360 | 3.106E-06 |
| Error Cuadrático | | | | 2.099E-04 |

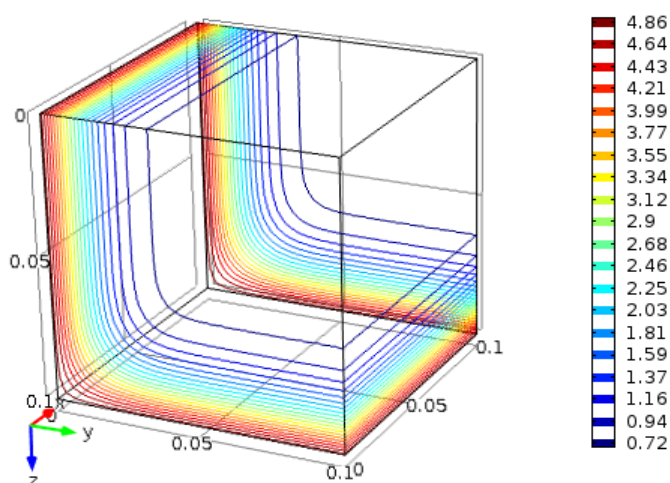


Figura 38. Ingreso de cloruros en 2D Comsol®

En la Figura 38 se muestra un perfil de cloruros en dos dimensiones del modelo extraído de la herramienta Comsol®; como se esperaba el contenido de cloruros es mayor en la superficie que en la zona cercana al acero de refuerzo, lo cual sucede por el nivel de recubrimiento que posee cada zona de la matriz de concreto, a mayor recubrimiento menor nivel de cloruros se encontrará.

8.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Según las curvas de nivel presentadas en la Figura 38 del modelo, se aprecia que los cloruros ingresan más rápidamente desde la esquina que se encuentra expuesta por las 2 caras. Debido a la dificultad en la toma de datos de polvo de concreto para generar una malla más fina, que representará un mayor número de datos para el perfil de cloruros, se seleccionaron puntos estratégicos de los cuales se interpoló puntos intermedios para graficar las curvas de nivel.

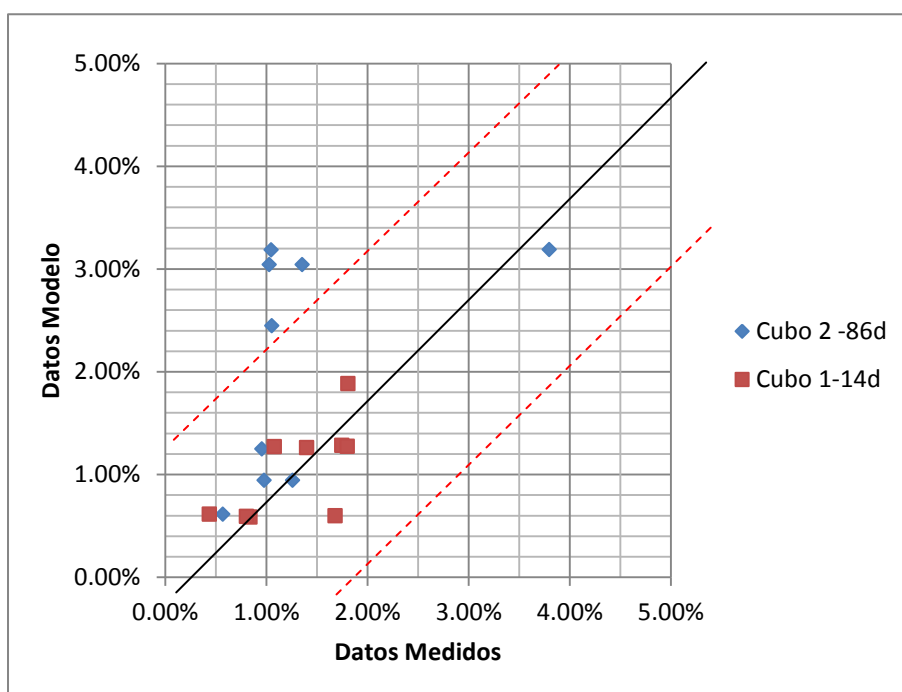


Figura 39. Dispersión de datos medidos contra modelo 2D

Se encontró dificultad en la etapa de extracción de las muestras, debido que se usó una broca menor al tamaño máximo de agregado. Adicionalmente, hubo zonas de medida donde potencialmente se obtuvo muestra con alto contenido de agregado en lugar de matriz cementante del concreto, lo cual en promedio disminuye el contenido de cloruros de la muestra. Así mismo, se dificultó el proceso de obtener una malla más fina en las

mediciones 2D debido a que según especificaciones de la norma se debe tomar por lo menos 20 gramos de muestra.

Análogamente a la dispersión usada para los cilindros se evaluó la relación de los datos medidos con los proyectados del modelo para el caso de los cubos de concreto 1 y 2(Figura 39), percibiendo un error similar al presentado en los cilindros, con la mayoría de datos a $\pm 1.5\%w_c$, lo cual muestra correspondencia entre los datos medidos y los del modelo. Se observa en la Figura 39 que la mayoría de los datos medidos coinciden con los datos del modelo por la cercanía de los mismos a la diagonal continua que representa la equivalencia 1:1. En algunos casos se presenta cierta dispersión por las razones antes mencionadas pero no muy lejos de lo esperado para este tipo de correspondencia entre los datos experimentales y los datos del modelo.

9. SENSIBILIDAD DEL MODELO

Para el análisis de sensibilidad del modelo, se realizaron variaciones entre los parámetros de entrada: el recubrimiento, el tiempo transcurrido, el coeficiente de difusión y la exposición. Para observar los cambios respectivos en la variable de salida, es decir, en la concentración del ión cloruro en el concreto a una distancia objetivo. Dichas variaciones se utilizaron para calcular un índice de sensibilidad, con base en la siguiente ecuación propuesta por Siamphukdee et al. (2012).

$$S = \left(\frac{O_{p2} - O_{p1}}{I_{p2} - I_{p1}} \right) \frac{I_{pavg}}{O_{pavg}} \quad (18)$$

Esta metodología se basa en un método de análisis que compara la variabilidad normalizada de una variable dependiente con respecto a una independiente, es adimensional y representa un % de aumento o reducción en la variable dependiente cuando ocurre un aumento en la variable independiente. Los límites superiores e inferiores de cada variable se presentan en la Tabla 18. Intervalos de Variacion de variables independientes Tabla 18.

Tabla 18. Intervalos de Variacion de variables independientes

| | Límite inferior | Límite superior |
|--------------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| Tiempo | 0 años | 10 años |
| Recubrimiento | 0 cm | 6 cm |
| Coeficiente de Difusión | 2.5 cm ² /año | 160.2 cm ² /años |
| Exposición | 0.74 %wc | 7.4 %wc |

En el modelo, I_{p1} y I_{p2} corresponden al menor y al mayor valor de entrada respectivamente, mientras que I_{pavg} es el promedio entre I_{p1} y I_{p2} . Los valores O_{p1} , O_{p2} y O_{pavg} corresponden a las salidas del modelo relacionadas a las entradas I_{p1} , I_{p2} y I_{pavg} , respectivamente. Los rangos de variación para las variables independientes se escogieron a partir de duplicar y reducir a la mitad los parámetros ingresados al modelo en su validación, o aumentar y reducir en un factor mayor en el caso que duplicar no sea suficiente para abarcar el intervalo común de la variable.

Se realizaron variaciones en el modelo sobre los parámetros de entrada: exposición superficial, tiempo, recubrimiento y coeficiente de difusión. Ante dichas variaciones, se observaron los cambios en el contenido de cloruro que se muestra en las Figura 40, 41, 42 y 43.

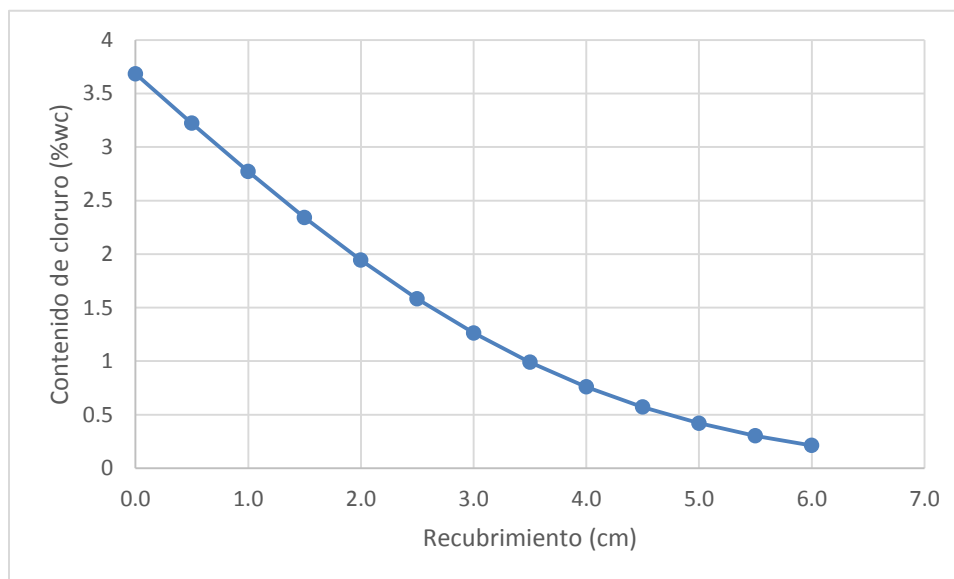


Figura 40. Gráfica de variación de recubrimiento vs contenido de cloruro

Como muestra la Figura 40, hay un decrecimiento no lineal del contenido de cloruro a medida que se incrementa el recubrimiento dentro de la estructura, esta variación es más conocida como perfil de cloruros. Lo anterior se debe a la parte no lineal en la ecuación teórica, que representa el fenómeno de difusión. En esta gráfica, la exposición superficial y el coeficiente de difusión son constantes con valores de 3.684 %wc y $2.5025 \text{ cm}^2/\text{año}$. Se espera que para un tiempo fijo, el contenido de cloruro sea mayor en la parte superficial, y disminuye a medida que se avanza dentro de la matriz del concreto.

La Figura 41 muestra la variación lineal del contenido de cloruro a medida que aumenta la exposición superficial, a medida que se duplica la exposición en la superficie se duplica el contenido de cloruros e igualmente sucede al disminuir a la mitad la exposición. En esta variación, el coeficiente de difusión es constante con un valor de $2.5025 \text{ cm}^2/\text{año}$, al igual que el tiempo $t=2$ años. Como muestra la gráfica, la relación entre estas dos variables es directamente proporcional.

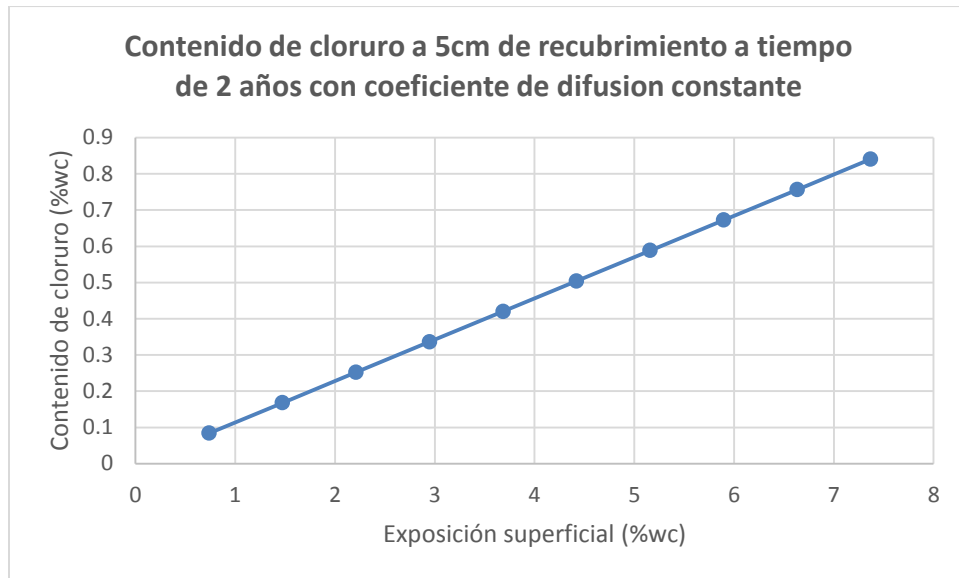


Figura 41. Gráfica de variación de exposición superficial vs contenido de cloruro

La Figura 42 muestra el cambio del contenido de cloruros con respecto al cambio en la variable tiempo. En esta gráfica, se puede observar el incremento no lineal que tiene el contenido de cloruros. Dicha característica se le atribuye al componente no lineal de la ecuación, donde se espera que a medida que pase el tiempo incrementa la cantidad de cloruros en el espécimen.

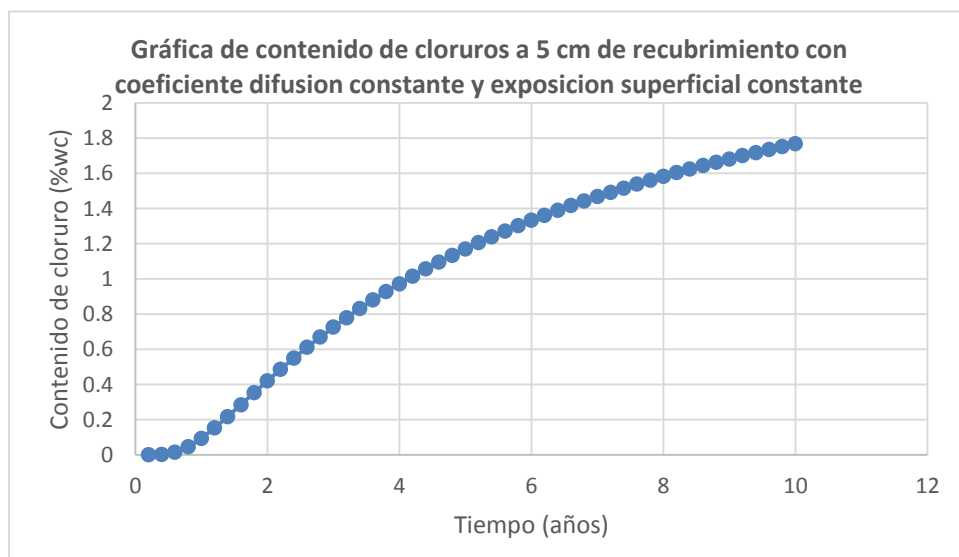


Figura 42. Gráfica de variación de tiempo vs contenido de cloruro

Con respecto a su comportamiento, inicialmente empezará con la concentración inicial de cloruros durante un determinado intervalo mientras el frente de cloruros se acerca a la barra de refuerzo. Luego tendrá un aumento asintótico hasta un límite superior de cloruros igual al valor límite de cloruros, matemáticamente hablando. Sin embargo, este límite se basa en el comportamiento de las leyes de Fick, usadas en el modelo, que no tienen en cuenta el enlace cloruro que hay internamente en el concreto.

En la Figura 43, se muestra la variación del contenido de cloruro con respecto al coeficiente de difusión. Similar a la gráfica anterior, se puede observar un incremento no lineal en el contenido de cloruro a medida que el coeficiente de difusión aumenta, esto se debe a que un aumento en el D_f está íntimamente ligado a un aumento en la velocidad de transporte de cloruros en la matriz de concreto, por lo cual aumenta la cantidad de cloruros en la superficie del acero a un determinado tiempo. La no linealidad se debe a la función error en la solución de las leyes de Fick. Adicionalmente, se puede observar una tendencia a medida que aumenta el coeficiente de difusión que tendrá como límite la exposición superficial.

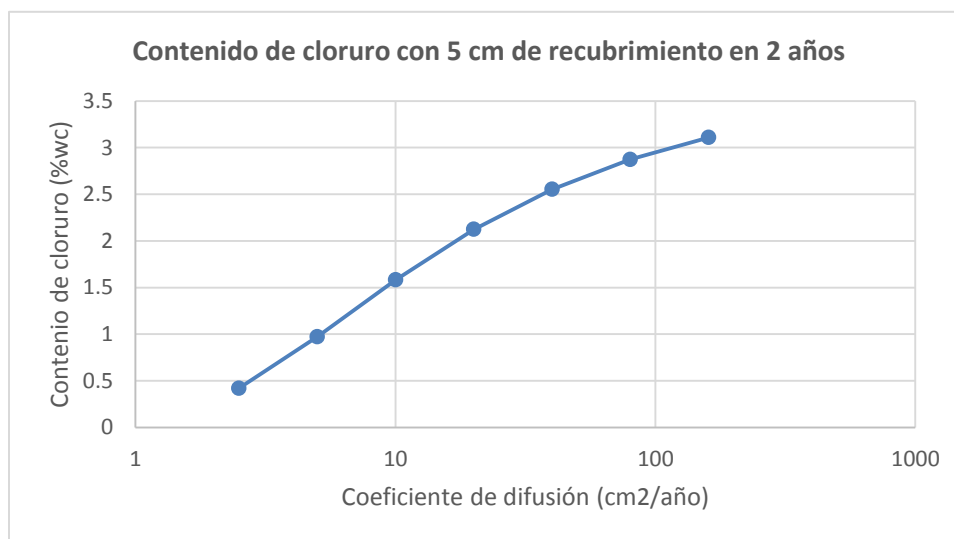


Figura 43. Gráfica de variación de coeficiente de difusión vs contenido de cloruro

En la Tabla 19, se puede observar de manera resumida los índices de sensibilidad del modelo, teniendo en cuenta los parámetros de entrada. El recubrimiento en el modelo resulta ser el único parámetro con índice de sensibilidad negativo. Esto indica que el crecimiento de sólo esta variable hace que la cantidad de cloruros disminuya. En otras

palabras, el contenido de cloruros disminuirá conforme aumenta la distancia donde se ubicará el acero en el espécimen de concreto.

Tabla 19. Índices de sensibilidad ante los distintos parámetros de entrada del modelo

| Parámetro | Índice de sensibilidad |
|-------------------------|------------------------|
| Recubrimiento | -1.37 |
| Exposición superficial | 1.00 |
| Tiempo | 0.77 |
| Coeficiente de difusión | 0.48 |

La variable con mayor sensibilidad es la exposición superficial de cloruros, por lo cual se puede afirmar que es mucho más crítica una estructura en zonas de alto contenido de cloruros en el medio (Zonas costeras) y por lo tanto aún más la zona expuesta a la acción de mareas, pues tiende a ser la zona de la estructura con mayor contenido de cloruros.

Para el caso del recubrimiento se puede notar que es la variable que genera mayor disminución del contenido de cloruros ya que en comparación con las otras variables al aumentar un 1% el recubrimiento disminuye en un 1.37% el contenido de cloruros. De igual manera es la variable que más se debe tener en cuenta si se quiere aumentar la durabilidad de una estructura ya que por errores constructivos si el recubrimiento se reduce de 5 cm a 4 cm tiene una disminución del 20% por lo que se generaría un aumento en promedio de 27.4% en el contenido de cloruros.

Para el caso de la exposición y el tiempo son variables que no se pueden controlar por lo que para aumentar la durabilidad de una estructura se debe aumentar el recubrimiento y disminuir el coeficiente de difusión.

10. CONCLUSIONES

Se definieron los parámetros que gobiernan el fenómeno de difusión aplicados a estructuras de concreto expuestas a la acción de cloruros, a saber: el coeficiente de difusión, la concentración superficial de cloruros, el contenido inicial y la geometría. Para modelar el fenómeno se usaron las ecuaciones de Fick.

A partir de un análisis estadístico de valores del umbral de cloruros encontrados en la literatura, se calcularon los valores de umbral de cloruros para los cuales existe una probabilidad de inicio de corrosión de 10, 20, 30, 40 y 50% los cuales corresponden a: 0.1361, 0.4390, 0.6574, 0.8440 y 1.0184 %wc respectivamente. Este parámetro es fundamental para predicciones de durabilidad de estructuras de concreto similares a las consideradas en el modelo. El tiempo en el cual puede iniciar la corrosión basándose en el umbral de cloruros promedio encontrado por diferentes autores, y por límites de Cl que se indican en la NSR-10 del 1%wc, fue cercano a los valores de probabilidad hallados. Se encontró que para concretos con coeficiente de difusión menor a $5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ la probabilidad de inicio de corrosión basado en el umbral de cloruros, es menor a 10% cuando se utiliza recubrimientos mayores o iguales a 7.5cm.

Comparando los resultados de los modelos de difusión de cloruros en 2D y 1D, se recomiendan los modelos 1D para elementos de concreto reforzados en los que se puede despreciar el efecto de borde como losas, muros y tableros de puentes; mientras que los modelos 2D representan mejor la situación encontrada en elementos como vigas y columnas. Para esto se evaluó la ruta crítica de inicio de la corrosión en la cual se muestra que a pesar de tener mayor trayectoria aumenta considerablemente la cantidad de cloruros en la superficie del refuerzo para el ingreso 2D. Por lo tanto, en términos de durabilidad, considerar el efecto de borde es vital para la predicción de inicio de corrosión en estructuras de concreto reforzado, debido al aporte de cloruros en dos direcciones.

Analizando el comportamiento de los datos obtenidos experimentalmente y graficándolos contra los resultados de los modelos 1D y 2D, se pudo apreciar que los datos son en su gran mayoría correspondientes entre sí. Esto comprueba la validación del modelo con probetas preparadas en el laboratorio y sometidas a la exposición directa de cloruros en solución, considerando cilindros de concreto con una cara expuesta para el caso 1D y cubos de concreto con dos caras expuestas para el caso 2D.

A partir de la sensibilidad del modelo se encontró que el recubrimiento es la variable que genera mayor influencia en el contenido de cloruros, ya que al aumentar un 1% el recubrimiento disminuye en un 1.37% el contenido de cloruros. De igual manera, es la variable que más se debe tener en cuenta si se quiere aumentar la durabilidad de una estructura; si por errores constructivos el recubrimiento se reduce de 5 cm a 4 cm (20% disminución), generaría un aumento promedio de 27.4% en el contenido de cloruros. Adicionalmente, se encontró que la vida útil de una estructura con concreto de 3000 psi y recubrimiento de 5 cm para el acero, sería de 5.44 años al ser modelada en una dimensión. Sin embargo, al considerar el efecto de borde, disminuye la vida útil aún más.

Se recomienda que para futuras investigaciones se evalúe el efecto del enlace del ión cloruro en la matriz de concreto al igual que la variabilidad del coeficiente de difusión aparente en el tiempo. De igual manera, plantear modelos acoplados con otros fenómenos de transporte de cloruros como la convección, migración y permeación, llevaría a predicciones más exactas del contenido de cloruros en el tiempo y por tanto, una diferencia más exacta entre el efecto de borde presentado en modelos 2D contra modelos 1D resultado del presente estudio.

11. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ababneh, A., F. Benboudjema, and Y. Xi. "Chloride Penetration in Nonsaturated Concrete." *Journal of Materials in Civil Engineering* 15, no. 2 (2003): 183–91. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:2(183).
- [2] ACI Committee 222. "Protection of Metals in Concrete Against Corrosion." American Concrete Institute, 2001.
- [3] Acosta, Torres, A. A, Perez Quiroz, J. T, Ramirez Renteria, A. J, and M. Martinez Madrid. "ESTUDIO DE LA CORROSION EN BARRAS DE ACERO INOXIDABLE EN CONCRETO CONTAMINADO POR CLORUROS CUANDO SE LE APLICAN ESFUERZOS RESIDUALES." *PUBLICACION TECNICA*, no. 287 (2006). <http://trid.trb.org/view.aspx?id=1098996>.
- [4] Ali, Al-Gadhib. "Numerical Simulation of Chloride Diffusion in RC Structures and the Implications of Chloride Binding Capacities and Concrete Mix." *October 2010 Vol. 10 Issue 5*, p22 (October 2010): 10.
- [5] Altaf A, Anil K. "Chloride ion migration/diffusion through concrete and test methods". *International Journal of advanced Scientific and technical research*. November 2013 Vol 6.
- [6] Alonso, C, C Andrade, M Castellote, and P Castro. "Chloride Threshold Values to Depassivate Reinforcing Bars Embedded in a Standardized OPC Mortar." *Cement and Concrete Research* 30, no. 7 (July 2000): 1047–55. doi:10.1016/S0008-8846(00)00265-9.
- [7] Andrade, Carmen, and Jörg Kropp. *PRO 19: 2nd International RILEM Workshop on Testing and Modelling the Chloride Ingress into Concrete*. RILEM Publications, 2000.
- [8] Ann, Ki Yong, and Ha-Won Song. "Chloride Threshold Level for Corrosion of Steel in Concrete." *Corrosion Science* 49, no. 11 (November 2007): 4113–33. doi:10.1016/j.corsci.2007.05.007.
- [9] ASM International. (January 2000). *CORROSION Understanding the basics*. United States of America.
- [10] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente*. Bogotá, D.C., Colombia, 2010.
- [11] Bažant, Z. P., and L. J. Najjar. "Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete." *Matériaux et Construction* 5, no. 1 (January 1, 1972): 3–20. doi:10.1007/BF02479073.

- [12] Biondini, Fabio, Franco Bontempi, Dan M. Frangopol, and Pier Giorgio Malerba. "Cellular Automata Approach to Durability Analysis of Concrete Structures in Aggressive Environments." *Journal of Structural Engineering* 130, no. 11 (November 2004): 1724–37. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:11(1724).
- [13] Calderón, F. A., Gaona, T. C., & Martínez Villafañe, A. (s.f.). *Monitoreo y control de la corrosión en estructuras de concreto*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., 1998
- [14] Castañeda Valdés, Abel, Nelson Días Brito, and Eva Gonzáles Mellor. "Influencia de La Penetración de Iones Cloruros En El Hormigón Armado a Diferentes Relaciones Agua/cemento Y Condiciones de Exposición," 2009. <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10328235>.
- [15] "COMSOL Multiphysics Modeling of Chloride Binding in Diffusive Transport of Chlorides in Concrete." Accessed September 29, 2014. http://www.academia.edu/7558018/COMSOL_Multiphysics_Modeling_of_Chloride_Binding_in_Diffusive_Transport_of_Chlorides_in_Concrete.
- [16] Crank, J., *The Mathematics of diffusion*. Segunda edición. Claredon Press, Bristol UK, 1975.
- [17] Dorner, H., & Beddoe, R. (s.f.). *Prognosis Of Concrete Corrosion Due To Acid*. Institute of Building Materials Science and Testing Technical University of Munich
- [18] Frederiksen, J., Mejlbro, L., y Nilsson, L. *Fick's 2nd law - Complete solutions for chloride ingress into concrete – with focus on time dependent diffusivity and boundary condition*. Report 3146. Division of building materials, Lund University, Lund, Sweden. 2009
- [19] G. H. K. Michael P.H. Koch, Neil G. Thompson, Y. Paul Virmani, and J.H. Payer. "Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States." FHWA-RD-01-156, 2002.
- [20] Galvez Ruiz, Jaime C. "Modelización Del Deterioro de Tableros de Puentes de Hormigón Por Difusión de Cloruros Y Corrosión de La Armadura Pasiva." Tesis Doctoral, Universidad politecnica de Madrid, 2010.
- [21] Glass, G. K., B. Reddy, and N. R. Buenfeld. "The Participation of Bound Chloride in Passive Film Breakdown on Steel in Concrete." *Corrosion Science* 42, no. 11 (November 2000): 2013–21. doi:10.1016/S0010-938X(00)00040-8.
- [22] Göran, Fagerlund. *The threshold chloride level for initiation of reinforcement corrosion in concrete*. Lund, Sweden: Lund Institute of Technology, 2011.
- [23] Guzmán S. "Modelización del deterioro de tableros de puentes de hormigón por difusión de cloruros y corrosión de la armadura pasiva", Universidad politécnica de Madrid, Madrid, 2010.

- [24] Jensen, O.Mejlhede, P.Freiesleben Hansen, A.M. Coats, and F.P. Glasser. "Chloride Ingress in Cement Paste and Mortar." *Cement and Concrete Research* 29, no. 9 (September 1999): 1497–1504. doi:10.1016/S0008-8846(99)00131-3.
- [25] Liu, T, and R. W Weyers. "Modeling the Dynamic Corrosion Process in Chloride Contaminated Concrete Structures." *Cement and Concrete Research* 28, no. 3 (March 1998): 365–79. doi:10.1016/S0008-8846(98)00259-2.
- [26] Lizarazo-Marriaga Juan, Claisse Peter. "Determination of the concrete chloride diffusion coefficient based on an electrochemical test and an optimization model", *Materials Chemistry and Physics*. VOL 117; NUMBER 2-3 (2009) pp. 536-543 (15 October 2009
- [27] L, Nilson, Sandberg P, Poulsen E, Tang Luping, Andersen Alf, and Frederiksen J. HETEK, A System for Estimation of Chloride Ingress into Concrete, Theoretical Background. Vol. Report 83. Copenhagen, Denmark: The Danish Road Directorate, 1997.
- [28] Elkin Mejia. "MODELADO DE LA DIFUSION DE CLORUROS EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO EXPUESTAS EN CONDICIONES MARINAS." Universidad Industrial de Santander, 2010.
- [29] Sidney Mindess, Francis Young, and David Darwin. *Concrete*, Second Edition. New Yersey: Prentice Hall, 2002.
- [30] Nelson, Silva. "Chloride Induced Corrosion of Reinforcement Steel in Concrete." CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2013.
- [31] Perepérez Ventura, B., E. Barbera Ortega, and Carmen Andrade. "La Agresividad Ambiental Y La Durabilidad de Las Estructuras de hormigón." *Informes de La Construcción* 38, no. 388 (April 30, 1987): 17–24. doi:10.3989/ic.1987.v38.i388.1639.
- [32] Poulsen, E., and L. Mejlbro. *Diffusion of Chloride in Concrete: Theory and Application*. CRC Press, 2010.
- [33] Rahman, M., W. Al-Kutti, M. Shazali, and M. Baluch. "Simulation of Chloride Migration in Compression-Induced Damage in Concrete." *Journal of Materials in Civil Engineering* 24, no. 7 (2012): 789–96. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000458.
- [34] Roa-Rodriguez, G., W. Aperador, and A. Delgado. "Calculation of Chloride Penetration Profile in Concrete Structures." *International Journal of Electrochemical Science* Vol. 8, no. Issue 4 (April 2013): p5022.
- [35] Sanjuán Barbudo, Miguel Ángel. *Cálculo Del Período de Iniciación de La Corrosión de La Armadura Del Hormigón*. España: Universidad Complutense de Madrid, 2005. <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10091107>.

- [36] Schueremans, Luc, Dionys Van Gemert, and Sabine Giessler. "Chloride Penetration in RC-Structures in Marine Environment – Long Term Assessment of a Preventive Hydrophobic Treatment." *Construction and Building Materials* 21, no. 6 (June 2007): 1238–49. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.05.006.
- [37] Siamphukdee, Kanjana, Frank Collins, and Roger Zou. "Sensitivity Analysis of Corrosion Rate Prediction Models Utilized for Reinforced Concrete Affected by Chloride." *Journal of Materials Engineering and Performance* 22, no. 6 (December 6, 2012): 1530–40. doi:10.1007/s11665-012-0447-1.
- [38] Solano S., Estupiñán H., Vásquez C., and Peña D.. "SIMULACIÓN DE LA DIFUSIÓN DEL CL- HASTA LA DESPASIVACIÓN DEL ACERO DE REFUERZO EN CONCRETO CON MICROSÍLICE Y EXPUESTO A CARBONATACIÓN | Estupiñán Duran | Boletín de Ciencias de La Tierra," Diciembre de 2013.
<http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/article/view/34049/45857>
- [39] Solís Carcaño, R., Moreno, E., Jiménez Torres, F., & Rosas Pérez, V. (2008). EVALUACION DE DAÑOS POR AGRESION AMBIENTAL EN VIVIENDAS DE CONCRETO REFORZADO. *Ingenieria*, 18, 45-55.
- [40] Song, Ha-Won, Chang-Hong Lee, and Ki Yong Ann. "Factors Influencing Chloride Transport in Concrete Structures Exposed to Marine Environments." *Cement and Concrete Composites* 30, no. 2 (February 2008): 113–21. doi:10.1016/j.cemconcomp.2007.09.005.
- [41] Steven F., Daily. *Understanding Corrosion and Cathodic Protection of Reinforced Concrete Structures*. Corpro Companies, Incorporated, n.d. Recuperado Octubre, 2014.
- [42] Tejada Tovar, Candelaria, Villabona Ortiz, Angel, & Villabona Durán, Yurley Paola. (2013). Modelo de difusión de cloruros en probetas cilíndricas de hormigón armado sumergidas en agua sintética. *Revista ION*, 26(1), 55-62
- [43] Tomati, Fernando, and Adrián Gabriele. "Análisis de Corrosión de Tuberías de Gas Y Petróleo," October 2011. <http://hltnetwork.com/wp/media/analisis-de-corrosion.pdf>.
- [44] Torres Acosta, A. A., Pérez Quiroz, J. T., Ramírez Rentarí, A. J., & Martínez Madrid, M. (2006). ESTUDIO DE LA CORROSIÓN EN BARRAS DE ACERO INOXIDABLE EN CONCRETO CONTAMINADO POR CLORUROS CUANDO SE LE APLICAN ESFUERZOS RESIDUALES. SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE , 99.
- [45] Villagrán Zaccardi, Y. A., and V. L. Taus. "Approximation by the Finite Element Method to the Preferential Chloride Diffusion through Interfacial Transition Zone in Concrete." *Latin American Applied Research* 41, no. 3 (July 2011): 279–84.

- [46] W Morris, A. Vico. "Chloride Induced Corrosion of Reinforcing Steel Evaluated by Concrete Resistivity Measurements." *Electrochimica Acta* 49, no. 25 (2004): 4447–53. doi:10.1016/j.electacta.2004.05.001.
- [47] Xi, Y., and Z. Bažant. "Modeling Chloride Penetration in Saturated Concrete." *Journal of Materials in Civil Engineering* 11, no. 1 (1999): 58–65. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(1999)11:1(58).
- [48] Yang, Lu, Garboczi Edward, Bentz Dale, and Davis Jeffrey. "Modeling Chloride Transport in Cracked Concrete: A 3-D Image-based Microstructure Simulation." Published October 3, 2012. http://www.nist.gov/manuscript-publication-search.cfm?pub_id=912153.
- [49] Yang, Lu, Zheng Chen, Qin Gao, and J. Ju. "Compensation Length of Two-Dimensional Chloride Diffusion in Concrete Using a Boundary Element Model." *Acta Mechanica* 224, no. 1 (January 2013): 123–37. doi:10.1007/s00707-012-0721-1.
- [50] Zeng, Yanwei. "Modeling of Chloride Diffusion in Hetero-Structured Concretes by Finite Element Method." *Cement and Concrete Composites* 29, no. 7 (August 2007): 559– 65. doi:10.1016/j.cemconcomp.2007.04.003.
- [51] Zofia, Szweda, and Zybura Adam. "Theoretical Model and Experimental Tests on Chloride Diffusion and Migration Processes in Concrete." *Procedia Engineering* 57 (January 2013): 1121–30. doi:10.1016/j.proeng.2013.04.141.